普通高等教育"十一五"规划教材

国家级物理实验教学示范中心系列教材

基础物理实验

周殿清◎主编

张文炳 冯　辉◎副主编



科学出版社

www.sciencep.com

(O-3373.0101)

基础物理实验

高等教育出版中心·数理出版分社
联系电话：010-64015178
E-mail：mph@mail.sciencep.com

ISBN 978-7-03-023346-2
9 787030 233462 >
定价：46.00 元

普通高等教育“十一五”规划教材
国家级物理实验教学示范中心系列教材

基础物理实验

主　编　周殿清
副主编　张文炳　冯　辉

科学出版社
北京

内 容 简 介

本书为普通高等教育"十一五"规划教材,国家级物理实验教学示范中心系列教材,是在总结武汉大学物理实验教学示范中心近十年实验教学改革成果的基础上编写而成的.全书结构紧凑,实验内容丰富,共编入45个基本实验和55个综合、设计性实验,有许多新颖而富有时代感的实验基础知识.书中对实验方法及其原理的叙述力求繁简共容、深入浅出,以利于学生的自主研究式学习.

本书可作为高等学校理工科物理类及非物理类各专业基础物理实验课程的教材或参考书,也可供其他专业和社会读者阅读.

图书在版编目(CIP)数据

基础物理实验/周殿清主编.—北京:科学出版社,2009
普通高等教育"十一五"规划教材·国家级物理实验教学示范中心系列教材
ISBN 978-7-03-023346-2

Ⅰ.基… Ⅱ.周… Ⅲ.物理学-实验-高等学校-教材 Ⅳ.O4-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第172801号

责任编辑:昌 盛 贾 杨/责任校对:赵桂芬
责任印制:张克忠/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版
北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717
http://www.sciencep.com

源海印刷有限责任公司印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销
*
2009年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16
2009年1月第一次印刷 印张:28 1/2
印数:1—4 000 字数:628 000

定价:46.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈长虹〉)

前　言

基础物理实验是高校理、工、农、医等各学科专业必修的基础实验课程，是为培养学生的创新能力和实践能力、提高学生的科学素质打下坚实基础的极其重要的教学环节. 随着时代的发展，特别是近年来随着物理学在其他学科中的迅速渗透和广泛应用，基础实验的内容日益丰富，要求日益提高. 为了适应这种变化，武汉大学国家级物理实验教学示范中心在"**激发兴趣、夯实基础、增强能力、探索创新**"的教学方针引导下，积极改革实验教学：在课程体系上，打破了力、热、电、光为序排课的旧程式，在基础物理实验中设置三个层次（基本实验、提高型实验、综合与设计性实验），以由低到高分层次递进模式推行基础实验的系统训练；在教学内容上，大力引进新技术、新手段、新成果，开出新实验，使基础实验紧跟时代发展而不断更新；在教学方法上实施"分段开放式"教学，根据三个层次不同的教学要求，由"部分开放"逐步过渡到"全开放". 本教材是总结我们近十年来物理实验教学改革的成果并吸收兄弟院校的成功经验编写而成的.

全书共分为 6 章，第 1 章讲述测量误差、不确定度及数据处理的基础知识，所涉及的内容以本课程必须掌握的基本要求为主，个别地方略有扩充. 在内容处理上，摒弃了传统误差理论中的一些不科学与不确切的内容，以国际权威组织制定的《测量不确定度表示指南》为标准来阐述不确定度的评定，采用高置信概率（约等于或大于 0.95）的扩展不确定度 U 的表现形式，以符合 ISO、IEC 以及工程技术中广泛应用的情形. 第 2 章到第 4 章为基本实验（共选编了 45 个实验），包含了力、热、电、磁、光方面基本的实验内容，可供一、二两个层次教学选择，以加强学生基本实验技能训练，夯实物理实验基础. 第 5 章为综合与应用性实验（共选编了 25 个实验），其内容涉及相关的综合知识或运用综合的实验方法、实验手段，对学生的知识、能力、素质形成综合的学习与培养. 第 6 章为设计性实验（共选编了 30 个实验）. 这是在学生做了一定数量的基本实验，能对实验方法、仪器使用等方面做出恰当评价后，为了培养学生自主地进行科学实验而设置的. 设计性实验只提出研究对象、要求，给予适当的提示，主要让学生自行确定实验方法、选择合适的仪器设备和设计一定的实验程序，自己加以实现并对结果进行分析处理. 这样既保证了基本训练，又提高了物理实验的综合性和实用性，促使学生更积极地完成实验，以利于学生的个性发展和创新能力的培养.

考虑到基础物理实验的独立性和面向低年级学生的特点，对于基本实验，编写时力求将实验原理叙述清楚，计算公式推导完整，使学生在实验预习时掌握理论依据；实验内容与步骤也尽可能具体，以加强对基本实验技能和基本实验方法的训练和指导. 一般地说，一个基本实验的课堂实习任务可在 3～4 学时内完成，部分实验有多个实习内容，教师安排时可进行取舍，也可供学有余地的优秀学生深入研究. 对于综合实验和设计性实验，编写时不局限在统一的格式上，有的重点放在新概念、新思路或原理的阐述上（如等色谱、吸收谱、液晶相变、光导纤维、液晶电光效应等）；有的则不过分强调理论上的完整，而将主要

内容放在实验方法和技巧的指导上(如计算机应用类实验及传感器特性与应用等);有的只提出课题任务和基本要求,让学生查阅相关资料,自行设计实验方案,选择仪器用具,完成实验测试,更多地发挥学生的主观能动性和创造性.这部分实验,根据各题目内容的不同一般可安排课内 4～12 学时完成,当然也允许有兴趣的学生利用课外开放时间进一步深入探索.实验项目的开篇引入了实验的意义及背景知识,以拓展学生的视野和知识面.多数实验后附有预习思考和回答题,前者引导学生预习时注意本实验的物理思想,弄清楚本实验的测量方法要点和值得注意的问题;后者引导学生在实验后进一步分析讨论,巩固和扩大所学知识.

经过几十年的教学实践,作过多次调整、更新和扩充,本实验教材才达到目前的规模和水平.这里面凝聚了广大教师和实验技术人员的集体智慧和辛勤劳动.本教材中的多数实验题目包含有许多同志先后的贡献,这里难以逐一记载他们的业绩.除主编外,参加本教材编写的教师主要有张文炳(第 2 章),冯辉(第 3 章实验 3.13、实验 3.14,第 5 章实验 5.5～实验 5.11,第 6 章实验 6.10～实验 6.21),赵新月(第 3 章),柯满竹(第 5 章实验 5.1～实验 5.4,第 6 章实验 6.1～实验 6.8).全书由周殿清统稿.

本书在编写过程中征求了许多实验指导教师的意见,参考并吸收了兄弟院校的有关资料和经验;武汉大学教务处、物理科学与技术学院的领导和许多资深教授对本教材的编写给予了极大支持和鼓励;科学出版社的编辑们为本教材的出版作了巨大的贡献.借此表示我们对他们的诚挚敬意和衷心感谢!

由于编者水平有限,编写时间仓促,书中难免有疏漏谬误之处,恳请读者和同行专家们批评指正.

编　者

2008 年 9 月于武汉大学

目　录

绪　论

物理学是自然科学的基础.物理学的每一次重大突破,不仅带来了物理学新领域、新方向的发展,而且导致新的分支学科、交叉学科和新技术学科的产生,推动了化学、生物和医学等各学科向更深层次发展,是这些学科成长和发展的基础和先导;物理学的思想方法和取得的成就,改变了人类对宇宙和自然的认识观和思维方式,彻底影响了人类社会.

物理学从本质上说是一门实验科学,物理概念的建立和物理规律的发现都以严格的实验事实为基础,并且不断受到实验的检验.物理学在自然科学其他领域、各高新技术领域的广泛应用也离不开实验.在物理学发展和应用的过程中,人类积累了丰富的实验方法,设计制造出各种精密巧妙的仪器设备,从而使物理实验课程有了充实的实验内容.物理实验在培养学生严谨的科学思维和理论联系实际方面,在训练学生运用实验手段去观察、分析、发现乃至研究、解决问题的能力方面,在提高学生科学实验素质方面,都起着极其重要的作用.因此,学好物理实验对高校理工科学生是十分重要的.

一、物理实验课的教学目的

普通物理实验(基础物理实验)课程是高等学校对理工类专业学生进行科学实验基本训练的必修课程,是大学生进入大学后接受实验方法和实验技能系统训练的开始.普通物理实验课覆盖广泛的学科领域,具有多样化的实验方法和手段,以及综合性很强的基本实验技能训练,它是培养学生创新意识和创新能力、引导学生确立正确科学思想和科学方法、提高学生科学素质的重要基础.本课程的教学,拟在以下三个方面帮助学生学有所成:

(1) 学习和掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能.通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,使学生能运用物理学原理和物理实验方法研究物理现象和规律,加深对物理学原理的理解.

(2) 培养与提高学生的科学实验能力,其中包括

自学能力:能够自行阅读教材或参考资料,正确理解实验内容,做好实验前的准备;

动手实践能力:能够借助教材和仪器说明书,正确调整和使用常用仪器;

思维判断能力:能够运用物理学理论,对实验现象进行初步的分析和判断;

书写表达能力:能够正确记录和处理实验数据、绘制图线,说明、分析实验结果,撰写规范的实验报告(或以科学论文的形式写出报告);

简单的设计能力:能够根据课题要求,确定实验方法和条件,合理地选择仪器,拟定具体的实验程序,正确地完成实验任务.

(3) 培养与提高学生的科学实验素质,使学生逐步养成理论联系实际、实事求是的科学态度,严谨踏实的工作作风,勇于探索、坚忍不拔的钻研精神和遵守纪律、团结协作、爱护公共资源的优良品德.

二、物理实验课的基本程序

普通物理实验课程是一门实验基础课，也是学生在教师指导下独立进行操作、测试的一项实践性活动. 为了更好地遵循教学规律，循序渐进地实现物理实验课程的教学目的，本课程分为三个层次来进行：第一层次为基础实验，着力培养学生的基本实验技能；第二层次为综合性实验，加强学生物理实验的综合应用训练；第三层次为设计性实验，拓展学生自主研究、自行设计的空间. 对于第一、二层次，课程的基本程序分为以下三个主要教学环节：

1. 课前预习

课前认真阅读教材中有关内容（必要时还需查阅有关参考资料），在理解本次实验的目的、原理的基础上，弄清楚要观察哪些现象，测量哪些物理量，要明确哪些物理量是间接测量量，哪些是直接测量量，用什么方法和仪器来测定，在此基础上写出预习报告. 预习报告包括：画出实验原理图，列出实验所依据的理论公式，画出数据记录表格. 有些实验还要求学生课前自拟实验方案，自己设计线路图或光路图，自拟数据表格等. 因此，课前预习的好坏是实验中能否取得成功的关键.

2. 课堂实习

课堂实习是实验课的重要环节，学生进入实验室后应按下列要求进行实验：

(1) 认真听取教师对本实验的要求、重点、难点和注意事项的讲解；对照仪器，仔细阅读有关仪器的使用说明和操作注意事项；进一步明确本实验的具体要求.

(2) 仪器（或实验装置）的调节. 在力学、热学实验中，一些仪器使用前往往需要调至水平或垂直状态，如杨氏模量仪需调铅直，气垫导轨需调水平等. 要注意测量仪器的零点，若某些仪器不能调零，则要记录仪器的零点值. 电磁学实验中，在连接电路前，应考虑仪器设备的合理摆放，电路连接好后，还要注意把仪器调节到“安全待测状态”，然后请教师检查，确定电路连接正确无误后方可接通电源进行实验. 光学实验的仪器调节尤显重要，它决定着实验能否顺利进行和测量结果是否精确可靠，一定要细心调节仪器到要求的使用状态.

(3) 观测. 实验中必须仔细观察、积极思维、认真操作、防止急躁. 要在实验所具备的客观条件（如温度、压力、仪器精度等）下，进行认真的、实事求是的观察和测量. 要初步学会分析问题，遇到问题时应冷静地分析和处理；仪器发生故障时，要在教师指导下学习排除故障的方法；在实验中要有意识地培养自己的独立工作能力.

(4) 记录. 实验数据的记录是计算结果和分析问题的依据，在实际工作中则是宝贵的资料. 要把实验数据细心地记录在原始记录纸的数据表格内. 记录时要用钢笔或圆珠笔，不要用铅笔. 如确实记错了，也不要涂改，应轻轻画上一道，在旁边写上正确值，使正误数据都能清晰可辨，以供在分析测量结果和误差时参考. 切勿先将数据记在草稿纸上，然后再誊写在表格内，这是一种不科学的习惯. 此外，还应记录环境温度、湿度、气压等实验条

件，仪器型号规格与编号，以及实验现象等.

总之，在课堂实习中希望同学们不要只会按照教材的实验步骤被动地去做，而要在弄懂原理的基础上自己思考着去做；不应片面追求快速完成数据测量，而应注重分析实验现象和所遇到的问题；应独立自主完成实习而不是依赖他人，否则，将收效甚微.

3. 课后小结(撰写实验报告)

在理解实验原理，充分分析实验现象、结果的基础上写出实验报告. 实验报告是实验工作的总结，是交流实验经验的材料，要求字体工整，文理通顺，图表规矩，结论明确，以逐步培养以书面形式分析总结科学实验结果的能力.

实验报告内容包括：

实验名称

实验目的

实验原理　用自己的语言对实验所依据的理论做简要叙述，并附有必要的公式和原理图(包括电路图或光路图)，不要照抄书本.

实验内容　概括地、条理分明地说明实验所进行的主要程序，观察到哪些物理现象，测量了哪些物理量，并说明对这些观测所采用的方法.

数据处理　将原始记录数据转记于报告上(原始记录也应附在报告上，以便教师检查)，该列表的要列表，该作图的要作图. 计算按照有效数字的运算法则进行，并求出结果的不确定度，正确运用不确定度表示实验结果.

结果分析　该部分要明确给出实验结果，并对结果进行分析与讨论(如对实验中观察到的现象、误差的来源进行分析，对实验中存在的问题进行讨论，回答实验思考题或习题等). 也可对实验本身的设计思想、实验仪器的改进等提出建设性意见.

实验报告分两次完成，预习报告即实验报告的前半部分(包括实验名称、实验目的、实验原理、实验内容)应在上课前写好，其余部分实验课后完成.

三、做好物理实验应注意的几个问题

前面对实验课的三个教学环节——课前预习、课堂操作、课后写出报告提出了明确的要求，这是做好物理实验、养成良好实验习惯的前提. 除此之外，还请同学们注意并力求做到下列各点：

1. 要注意各类实验的特点

力学、热学实验中要注意仪器装置的水平或铅直调节、量具的零点调节与修正；各个实验中要注意数据处理方法的具体应用.

电磁学实验要按原理线路图正确接线；注意调节仪器到“待测安全状态”，如未合电源前，使电源的输出调节旋钮处于使电压输出为最小值，使电阻箱接入电路的电阻不为零等；注意人身安全，正确地读取各类电表数据是实验成功的关键.

光学实验与上述实验相比，仪器的调节工作更显重要，它决定了实验能否顺利进行和

测量结果是否精确可靠. 这是因为在研究或观察某一光学现象(如光的干涉现象)时,首先必须调整仪器或装置的各个部件,使一切有用的光线按照预定的路径和方向进行传播,并遮掉一切无用的光线. 在要求测量某些物理量(如波长、折射率等)时,由于这些物理量一般是通过测量长度或角度等几何量来实现的,因此要求进一步调整(如共轴调节、分光计状态调节等),使要测量的各个几何量与仪器系统的机械结构一致(如光具座的刻度尺、分光计的刻度盘). 因为只有这样才能保证从仪器中读取的数值就是所要测量的各物理量的数值,从而保证实验结果的可靠性.

2. 要明确实验的物理思想

完成一个实验,不单单是为了测得一个实验结果,更重要的是,通过实验进一步明确它的物理思想,学会如何根据其物理思想确定合理的实验方案,正确选择仪器,或者构建新的实验装置. 做完一个实验,可以思考一下,这个实验为什么要这样设计,能不能用别的仪器和方法来完成,这对我们做综合、设计和研究性实验尤为重要.

在做基本实验时要做到以下两点:第一,在了解仪器性能的基础上建立清晰的物理图像,这对有效而准确地调好仪器有帮助.(如分光计结构的物理图像,参考教材 P218). 第二,明确实验方法的物理内涵. 例如,用“自由落体法”和“单摆法”测量重力加速度,哪种方法更优越呢? 答案显然是后者. 后者将数值很大的下落加速度的测量转变为很小的摆动加速度的测量,从而延缓了所要观察的进程,而且又由于可对周期进行多次重复测量,提高了测量精度.

3. 要学会分析实验

(1) 要学会用实验中观察到的现象,分析现象的形成原因,来指导仪器的调节工作. 例如,分光计、迈克耳孙干涉仪的调节等.

(2) 学会排除实验过程中出现的故障.

第一,当观察某一物理现象达不到目的时,要检查实验线路是否接好、光路或实验装置是否调好,实验参数的选择是否恰当,如音叉受迫振动实验中,音叉的共振频率选择不当不能产生共振,声速测量实验中超声换能器激励频率选择不当不能形成驻波.

第二,当测量数据不准确时,不要一口咬定“仪器有问题”,造成结果不理想的原因是多方面的,如理解上的偏差、仪器调节不到位、电路接错、看错了现象、数错了数等. 此时要通过分析找出原因,并重测一遍. 如果确定操作和读数无误,则毛病可能出在仪器上,此时可让指导教师或实验技术人员帮助解决.

(3) 学会分析和评价实验结果.

实验结果的评价,主要靠分析实验本身加以判断. 因此,实验时要记录实验条件(包括实验时间、环境温度、气压、所用仪器的编号等)及观察到的实验现象(特别是异常现象),原原本本记录好测量数据,这些资料是分析实验误差的主要依据. 有些实验的测量结果还要给出不确定度,不确定度是评价实验结果的科学依据.

测量值存在误差的原因是多方面的,如测量仪器不完善和调节不到位的问题、测量方法问题、测量者的“估读”和“判断”问题等. 具体分析实验误差时,要考虑实际上可能对测

量结果产生影响的各种因素，分析其影响的大小. 任何实验都不要求把一切影响因素全部消除，这在经济上、时间上、精力上都会造成浪费，而实际上也不可能做到；只要达到一定的误差允许范围就行. 这就要求我们在各种实验中认真思索，不断积累经验，丰富知识，提高分析判断能力.

第1章 测量误差、不确定度及数据处理的基础知识

本章从实验教学的角度出发，主要介绍测量误差和不确定度的基本概念、测量不确定度的估算、实验数据处理等方面的基础知识. 这些知识不仅在每个物理实验中都要用到，而且对今后从事科学实验也是必须要了解和掌握的. 由于这部分内容涉及面较广，深入的讨论需要有丰富的实践经验和较多的数学知识，因此不能指望通过一两次学习就完全掌握. 我们要求实验者首先对提到的问题有初步的了解，以后结合具体实验再仔细阅读有关内容，通过实际运用逐步加以掌握.

误差分析、不确定度计算及数据处理贯串于实验的全过程，它表现在实验前的实验设计与论证，实验进行过程中的控制与监视，实验结束后的数据处理和结果分析. 通过本章的学习和今后各个实验中的运用，要求达到：

(1) 建立测量误差和不确定度的概念，正确估算不确定度，懂得如何正确、完整地表示测量结果.

(2) 了解系统误差对测量结果的影响，学习发现某些系统误差、减小系统误差及削弱其影响的方法.

(3) 了解有效数字与不确定度的关系，掌握有效数字的运算规则.

(4) 掌握列表法、作图法、逐差法和回归法等数据处理方法.

1.1 测量误差的基本知识

1.1.1 测量的基本概念与读数规则

物理学分析研究自然界各种现象的方法是：首先观察现象，从中寻找具有大小的要素，然后用这些要素之间的数量关系来表示现象. 这些具有大小的要素叫做物理量（或简称量），物理定律一般可用物理量之间的数量关系来表达. 物理量的量值一般是由一个数乘以测量单位所表示的特定量的大小，有些量（如力、速度、电场等）除用数值和单位表示其大小（强弱）外，还要考虑其方向. 如果是通过实际测量而得的量，还必须标明测量不确定度的大小. 即凡是通过实验测得的量（除个别无单位常数外）都必须有数值、单位和测量不确定度，有的还要注明方向.

物理实验中的主要内容之一就是进行观测. 所谓“观”，就是认真观察实验中可能出现的各种物理现象，以便认识其规律. 所谓“测”，就是定量地测出各物理量的数值. 观察往往只能对物理现象作定性的分析，只有通过定量测量，得到各物理量，并找出它们之间的数量关系，才能对各种物理现象有深刻的、规律性的认识. 可见，测量在物理实验中占有重要的地位.

1. 测量

测量是将预定的标准与未知量进行定量比较的过程. 为了使结果具有一定的意义,在测量过程中必须满足如下两个条件:①预定的标准必须是已知精确的量,并为人们所公认;②用以进行这种定量比较的仪器设备和程序必须能被证明是正确的.

进行测量时,观察者对确定的测量对象,必须利用适当的测量装置、仪器或设备,并运用正确的测量方法. 一切测量必定是在以多种物理因素为特点的、可能对测得值产生影响的一定测量条件下进行,我们把观察者、测量对象、测量仪器、测量方法及测量条件统称为测量要素.

物理量的测量有两种基本类型:直接测量和间接测量.

1) 直接测量

直接测量就是将待测量与基准或标准直接进行比对,从而直接读出待测量是标准单位的多少倍. 为了进行统一的定量比较,国际计量组织对基本物理量的计量单位都做了明确规定(表1.1.1),人们依据这些标准制成一定单位刻度的量具、仪器或仪表,以便直接读取待测量的数值. 例如,米尺测量长度、天平称衡质量、秒表测定时间间隔、温度计测定温度、安培表测定电流、光度计测定光强度等均是直接测量. 当我们对某一物理量进行测量时,可根据实际需要和可能,进行单次测量、相同条件下的多次测量或人为改变实验条件反复测量多次. 所谓相同条件是指观察者、所用仪器、测量原理和方法及外部环境等宏观条件相同.

表1.1.1　国际制(SI)基本单位、辅助单位

	物理量	单位名称	单位符号	定　义
基本单位	长度	米	m	1m是光在真空中于1/299792458s时间间隔内所经路程的长度
	质量	千克	kg	1kg等于国际千克原器的质量
	时间	秒	s	1s相当于^{123}Cs原子基态两个超精细能级之间跃迁所对应辐射的9.129631770×10^9个周期的持续时间
	温度	开(尔文)	K	1K是水三相点热力学温度的1/273.16
	电流	安(培)	A	强度相等的恒定电流通过真空中相距1m的两根无限长且圆截面可忽略的平行直导线时,若此导线间每米长度上产生的力为2×10^{-7}N,则每根导线中的电流为1A
	物质的量	摩(尔)	mol	摩尔是系统的物质的量,该系统中所含的结构粒子(原子、离子、分子等)数与0.012kg的^{12}C所含的原子数相等
	光强度	坎(德拉)	cd	坎德拉是光源在给定方向上的发光强度,该光源发出频率为540×10^{12}Hz的单色辐射,且在此方向上的辐射强度为1/685(W·sr^{-1})
辅助单位	平面角	弧度	rad	1rad是圆内两条半径之间的平面角,这两条半径在圆周上所截弧长与半径相等
	立体角	球面度	sr	球面度是立体角,其顶点位于球心,它在球面上所截取的面积等于以球半径为边长的正方形的面积

2) 间接测量

对于一些没有提供直接读数仪表的物理量,可以利用它与另外一些可直接测出的物

理量之间的函数关系间接求取，这种测量称为间接测量. 例如，为测定当地的重力加速度 g，我们可以采用单摆装置，直接测得单摆的摆长 l 和摆动周期 T，而用单摆的周期公式求出 $g=4\pi^2 l/T^2$.

应该指出，为了确定实验手段或方法的可行性，为了检验实验仪器或装置的稳定性、重复性，为了判断实验结果的可靠性，为了验证物理规律的正确性，对间接测量量，往往不仅应该在宏观条件基本相同的情况下进行多次重复测量，而且需要人为地改变环境条件，变更测量仪器、变换测量方法、重选实验参量乃至调换观测者，反复测量多次.

2. 读数规则

一切物理测量最终将转化为对某些物理量的直接测量. 测量必须读数. 因此，为了做好实验、获得可靠的测量数据，除了应该养成良好的读数习惯、尽量减少视差外，采取正确的读数方法是十分重要的. 因为仪器的可读度取决于采用模拟显示的仪表和观测者，所以，当对观测者提出正确的读数要求时，也应区别不同仪器. 现分述如下：

(1) 对于一般线性刻度的仪器仪表（连续式的），应估读至其分度值的十分之几. 例如，米尺，其分度值为 1mm，读数时应估读至十分之几毫米，这是因为，在生产此类仪器时，所允许实现的最小分度应略大于该仪器的不确定度，一般为 1～2 倍. 另外，这种规定也容易为正常人眼的分辨能力所接受. 此外，实际上它包括了对于那些刻度较密、指针又较粗或被测物与刻度容易造成视差的仪器可读至其分度的 1/2 的规定，但又不排除可以对其估计得更仔细些.

(2) 对于非线性刻度的仪器仪表一般不要求估读. 例如，热电偶真空计的显示压力读数.

(3) 对于不确定度与分度值非常接近的仪器，不必进行估读. 例如，各类带有游标（或角游标）的仪器装置，是依靠判断两个刻度中哪条线对齐来进行读数的，这时记下对齐线的数值，不必进行更细的估读.

(4) 对于示值不是连续变化而是以最小步长跳跃变化的仪表，读数时不可能进行估计. 例如，数字显示仪表，只能读出其显示器上显示的数字；当该仪表对某稳定的输入信号表现出不稳定的末位显示时，则表明该仪表的不确定度可能大于末位显示的±1，此时可记录一段时间间隔内的平均值. 又如机械停表摆轮的擒纵叉是突变的，无论何时启动或止动停表，由齿轮驱动的指针示值终将与摆轮半周期的整数倍所代表的时间相对应，而且要求设计表盘分度时必须与摆轮的半周期相吻合，所以，对机械停表只能读出其分度值. 电动停表的分度值与其交流电源的半周期相对应，因此也只能读出其分度值.

应该指出，掌握上述读数规则十分重要，通过后面的讨论将会发现：仪器、仪表读数的末位即是读数误差所在的一位，它将直接关系到对测量结果不确定度的估计.

1.1.2 误差的定义与分类

1. 误差的定义

在一定条件下，任何一个物理量的大小都是客观存在的，都有一个实实在在、不以人

的意志为转移的客观量值，称为真值. 在测量过程中，我们总希望准确地测得被测量的真值. 但是，任何测量总是依据一定的理论和方法、使用一定的仪器、在一定的环境中、由一定的人员进行的. 由于实验理论的近似性、实验仪器的灵敏度和分辨能力的局限性、实验环境的不稳定性和人的实验技能和判断能力的影响等，使测得值与被测量的真值之间不可避免地产生差异. 我们把测得值(y)和被测量的真值(Y_t)之差叫做误差. 据定义，测得值 y 的误差可表示为

$$\delta_y = y - Y_t \tag{1.1.1}$$

上式所定义的测量误差反映了测得值偏离真值的大小和方向，因此又称 δ_y 为绝对误差. 一般来说，真值仅是一个理想的概念，只有定义严密时通过完善的测量才可能获得. 但是，严格的完善测量难以做到，故真值就不能确定；由于真值的不可知性，人们在长期的实践和科学研究中归纳出以下几种约定真值：

(1) 理论真值. 理论设计值，公理值，理论公式计算值.

(2) 计量约定值. 国际计量大会规定的各种基本单位值，基本常数值.

(3) 标准器件值. 标准器件相对于低一级或二级的仪表，前者是后者的相对标准值.

(4) 算术平均值. 指多次测量的平均结果，当测量次数趋于无穷时，算术平均值趋于真值.

绝对误差可以表示某一测量结果的优劣，但在比较不同测量结果时则不适用，需要用相对误差表示. 例如，测量 10.000m 长相差 1mm 与测量 1.000m 长相差 1mm，两者绝对误差相同，而相对误差不同. 相对误差 E_r 定义为

$$\text{相对误差 } E_r = \frac{\text{绝对误差 } \delta_y}{\text{真值 } Y_t} \approx \frac{\delta_y}{y} \tag{1.1.2}$$

误差存在于一切科学实验和测量过程的始终. 在实验的设计、仪器本身的精度、环境条件及数据处理中都可能存在误差，虽然一般不知道真值，因而不能计算误差，但是能分析误差产生的主要因素，能减少或基本消除有的误差分量对测量结果的影响. 对测量结果中未能消除的误差影响，要估计出它们的极限值或表征误差分布特征的参量，如标准偏差. 为此，必须进一步研究误差的性质和分布特征.

2. 误差的分类

按照习惯的分类方法，根据误差的性质，测量误差可分为系统误差和随机误差.

1) 系统误差

系统误差是重复测量中保持恒定或以可预知方式变化的测量误差分量，简称系差. 其特点是确定性、有规律性、可修正性.

系统误差主要来源于以下几个方面：

(1) 仪器误差. 这种误差是由仪器的制造公差或未按确定条件使用所致，如天平不严格等臂、米尺刻度不均匀、水银温度计毛细管内径不均匀、分光计读数装置的偏心差、放大器的非线性等. 仪器的规定使用条件是指外界影响因素对仪器的计量特性影响不大的一个允许范围. 当在规定条件下使用时，只引入仪器的基本误差；如果仪器应有的水平度或垂直度得不到保证，或超出了仪器对温度、湿度、气压的允许范围；不按照规定的电源电压

及频率供电等，即不按规定条件使用仪器就会导致新的测量误差(附加误差)(如规定20℃使用的标准电池在30℃时使用等).

(2) 理论或方法误差. 它是由测量所依据的理论公式近似或实验条件达不到理论公式所规定的要求等引起的. 例如，单摆的周期公式成立的条件是摆角趋于零，实际实验时却不能达到，在小角度下也只是一个近似公式，如用该公式测定重力加速度，则必定带来测量误差. 又如，在测量空气比热容比的实验中，要求其放气过程为准静态绝热过程，但实际上却不能实现. 再如，伏安法测电阻时，不考虑电表内阻的影响等.

(3) 人为误差. 它是由观测者本身缺乏经验或生理、心理上的特点所致. 例如，用停表记时时，总是超前或滞后；对仪表读数时不能正视而有习惯性的偏向；用温度计测温时未等温度稳定即开始读数等.

系差按对其掌握程度可分为已定系差和未定系差：

已定系差 指误差取值的变化规律及其符号和绝对值都能确切掌握的误差分量. 实验中应尽量消除已定系差，或对测量结果进行修正，得到已修正结果. 修正公式为

$$已修正结果 = 测量值(或其平均值) - 已定系差 \tag{1.1.3}$$

例如，采用电流表内接的电路接法测量电阻，如果用电压 U 除以电流 I 得电阻值 R，会产生大小为 R_1 的系差，而用 $R=U/I-R_1$ 代替 $R=U/I$ 的简单算法，能基本消除电流表内阻的已定系差影响. 预先调整仪表零点等操作，能减小测得值的系差.

未定系差 指不能确切掌握误差取值的变化规律及其符号和绝对值的系差分量，一般只能估计其限值或分布特征值. 例如，仪表的基本允许误差主要属于未定系差.

系差按其表现的规律可分为定值系差和变值系差：

定值系差 这种误差在测量过程中其符号和绝对值恒定不变. 例如，千分尺没有零点修正，天平砝码的标称值不准确等.

变值系差 这种误差在测量过程中呈现规律性变化. 这种变化，有的可能随时间而变，有的可能随位置变化. 例如，分光计刻度盘中心与望远镜转轴中心不重合，存在偏心差所造成的读数误差就是一种周期性变化的系差.

由系差的特点及来源不难看出，相同条件下的多次测量方法不能减弱或消除系差，但是它可能帮助人们发现那些由于外界影响因素而导致的系差. 改变实验条件进行反复测量，然后根据测量结果和实践经验进行分析，不仅可以发现系差的存在、找到产生这种系差的原因，而且可能尽量减弱乃至消除某些系差对测量结果的影响(本节1.3).

2) 随机误差

随机误差是重复测量中以不可预知的方式变化的测量误差分量. 其特点：随机性、服从统计规律.

随机误差的产生，一方面是由测量过程中一些随机的未能控制的可变因素或不确定的因素引起的，如人的感官灵敏度以及仪器精密度的限制，使平衡点确定不准或估读数有起伏；由于周围环境干扰而导致读数的微小变化，以及随测量而来的其他不可预测的随机因素的影响等. 另一方面是由被测对象本身的不稳定性引起的，如加工零件或被测样品本身存在的微小差异，这时被测量量就没有明确的定义值，这也是引起随机误差的一个原因.

随机误差就个体而言是不确定的，其大小和正负以不可预知的方式变化，导致重复测量中的分散性，但其总体(大量个体的总和)服从一定的统计规律，因此可以用统计方法估算其对测量结果的影响.

由于系统误差和随机误差的性质不同，来源不同，所以处理方法也应不同，在精确测量时应该加以区别、分别处理. 如果只是为了说明总误差的限度，就可以不严格加以区分，如许多不太精密的仪器，其最大允许误差(又称允差或允许误差极限)就是既包含有系统误差，又包含有随机误差.

除系统误差和随机误差外，还有一类误差. 由于外界干扰、操作读数失误等原因而明显超出规定条件下的预期值，称为粗大误差. 包含粗大误差的测得值或粗大误差称为异常值，实验测量要尽量避免出现高度显著的异常值，已被谨慎确定为异常值的个别数据要剔除.

应该指出：在任何一次测量中，一般系统误差和随机误差是同时存在的. 系统误差对应测量的*不准确度*；随机误差对应测量的*不精密度*；测量结果的总误差则对应测量结果的*不确定度*.

1.1.3　系统误差的发现及处理方法

在许多情况下，系统误差常常不明显地表现出来，然而它却是影响测量结果准确度的主要因素，有些系统误差会给实验结果带来严重影响. 因此，及时发现系统误差，设法修正、减弱或消除它对实验结果的影响，是实验误差分析的一个很重要的内容.

1. 系统误差的发现

系统误差产生的原因很多，它可以来自各测量要素. 因此，要发现系统误差，除应具备系统的理论知识外，还需要丰富的实践经验. 认真推敲理论公式推导过程中所要求的条件，仔细分析测量方法或步骤的每一环节，校准测量仪器并检查仪器的使用条件以及全面考虑各物理因素可能对实验带来的影响，是发现系统误差的出发点. 现将常用的几种发现系统误差的方法介绍如下：

1) 数据分析法

当随机误差比较小时，将待测量的绝对误差按测量次序排列，观察其变化. 若绝对误差不是随机变化而呈规律性变化，如线性增大或减少、周期性变化等，则测量中一定存在系统误差.

2) 理论分析法

(1) 分析理论公式所要求的条件与实际实验条件的差异. 例如，气垫导轨实验中，滑块在导轨上的运动因受到周围空气及气垫层的黏滞性摩擦阻力的作用会导致速度减小. 如果实验中作为无摩擦的理想情况来处理，就会产生与摩擦力有关的系统误差. 又如，用单摆测重力加速度时使用的公式 $T=2\pi\sqrt{l/g}$，理论要求摆角 $\theta\to0$，摆球半径 $r\to0$，且不计空气阻力，而这样的条件实际实验中均不能保证.

(2) 分析仪器所要求的使用条件与实际实验条件的差异. 例如，测定杨氏模量时要求

伸长仪铅直，而实际实验中样品伸长方向可能与重力作用方向之间有一倾角；又如，气压计在0℃时方可读出准确的气压，而在实际实验时环境温度为20℃，水银的密度及刻度尺均会发生变化等.

3) 实验分析法(改变实验条件进行分析对比)

(1) 用标准仪器或准确度等级较高的仪器进行对比测量，能发现仪器是否存在系统误差.

(2) 采用不同方法测量同一物理量，将所得结果进行分析对比，若它们在随机误差允许的范围内不重合，则说明至少有一组测量中存在系统误差. 例如，用单摆、自由落体和斜面实验同测当地的重力加速度，用流体静力称衡法、比重瓶法或根据定义式测定同种物质在同一温度下的密度等.

(3) 有意识地改变实验参量的数值，可以发现某些系统误差. 例如，改变摆角测周期，可以发现摆角大小对周期的影响；选择不同的初、末温，可以发现量热实验中系统与外界的热交换对实验带来的影响等.

(4) 不同观测者在其他测量条件完全相同的情况下进行实验对比，可以发现个人误差.

(5) 改变测量位置可以发现仪器结构不对称产生的系统误差. 例如，改变初始位置进行测量，可以发现尺子刻度不均匀而存在的系统误差(称为随机化方法)；采用左称和右称法可以发现天平臂长不等而存在的系统误差(称为复称法)；度盘转180°读数可以发现度盘偏心而存在的系统误差(称为对径测量方法).

2. 减弱或消除系统误差的方法

任何实验仪器、理论模型、实验条件，都不可能理想到不产生系统误差的程度. 对于系统误差的处理，一是进行修正，二是减弱或消除其影响.

1) 找出修正值，对测量结果进行修正

(1) 零点误差. 待测量为零时仪器的示值 δ_{x_0} 称为零点误差. 由定义，当待测量输入后仪器示值为 x' 时，测量值 x 应为 $x=x'-\delta_{x_0}$. 只要在测量前读出仪器的零点误差，即可由此式将其完全消除.

(2) 用标准或准确度高的仪器对实验仪器进行校准，得到修正值或校准曲线，并由此对测量值进行修正.

(3) 对由理论公式的近似造成的误差，找出修正值进行修正.

2) 消除产生系统误差的根源

如果能够找到产生系统误差的根源，无论是理论模型、实验仪器还是实验条件，我们都可以使其更完善，从而减小系统误差的影响. 例如，采用更符合实际实验条件的理论公式；确保仪器装置满足规定的使用条件，使测量结果只含仪器装置的基本误差，而不引入附加误差等.

3) 采用适当的测量方法，减弱或消除某些系统误差的影响

(1) 交换抵消法. 在测量过程中对某些条件(如被测物的位置)进行交换，使产生系统

误差的原因对测量结果起相反的作用，从而抵消某些系统误差. 例如，为了消除天平不等臂而产生的系统误差，可将被测物作交换测量；测定杨氏模量时，在增、减砝码过程中测伸长量的方法；从分光计度盘相隔 180°的两处读数取平均来消除偏心差的对径测量方法等.

(2) 替代消除法. 保持其他测量条件不变，选择一个大小适当的已知量（通常是可调的标准量）替代被测量而不引起测量仪器示值的改变，则被测未知量等于这个已知量. 由于在替代的两次测量中，测量仪器的状态和示值都相同，从而消除了测量过程带来的系统误差. 例如，用已知量替代待测量，使电桥重新达到平衡的测量方法，可消除桥臂带来的系统误差.

(3) 线性观测法. 可消除与测量时刻成线性关系变化的线性系统误差. 具体做法是每隔相等时间轮流测标准量和待测量，若两次测标准量 a_1 和 a_2 之间测待测量 x，则其平均值 $a=(a_1+a_2)/2$ 应与待测量 x 相对应. 在仪器仪表的校准中经常采用线性观测法，这是因为，许多系统误差都随时间而变化，且在短时间内均可认为是线性变化，即使按照复杂规律变化的误差，其一级近似也仍为线性误差.

(4) 随机化方法. 这种方法是改变实验条件测量多次，使被怀疑为引起系统误差的因素按随机方式变化，从而使该因素的作用由系统性转变为随机性，由此减少结果的系统误差. 例如，我们怀疑米尺刻度不均匀，可以随机地改变起点测量多次，然后按随机误差的理论处理数据以减小系统误差.

必须指出，任何对系统误差的修正或消除方法，都是相对的，所谓消除系统误差的影响是指将其影响减小到小于随机误差的程度.

1.1.4　随机误差的分布特征

随机误差的出现，就某一测量值来说是没有规律的，其大小和方向都是不能预知的，但对同一物理量进行多次重复测量时，则发现随机误差的出现服从某种统计规律. 随机误差的分布有多种，不同的分布有不同形式的分布函数，但无论哪一种分布形式，一般都有两个重要的参量，即平均值和标准偏差.

1. 正态分布规律

理论和实践都证明，大多数随机误差服从正态分布（高斯分布）规律. 下面简要讨论正态分布的特点及特性参量.

标准化的正态分布曲线如图 1.1.1 所示. 图中横坐标 x 表示某一物理量的测量值，纵坐标表示测量值的概率密度 $f(x)$

$$f(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-(x-m)^2/(2\sigma^2)}$$

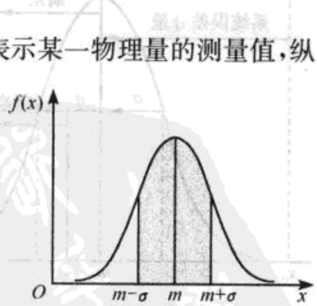


图 1.1.1　正态分布曲线

式中

$$m=\lim_{n\to\infty}\frac{\sum_{i=1}^{n}x_i}{n}$$

m 为总体平均值.

$$\sigma = \lim_{n\to\infty}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - m)^2}{n}}$$

σ 称为正态分布的标准偏差，是表征测量分散性的一个重要参量.

从曲线上看，曲线峰值处的横坐标相应于测量次数 $n\to\infty$ 时测量平均值，即总体平均值 m，横坐标上任一点 x_i 到 m 的距离 $(x_i - m)$ 即为测量值 x_i 的随机误差分量. 标准偏差 σ 为曲线上拐点处的横坐标与 m 值之差. 这条曲线是概率密度分布曲线. 曲线与 x 轴之间的面积为 1，可以用来表示随机误差在一定范围内的概率. 例如，图中阴影部分的面积就是随机误差在 $\pm\sigma$ 范围内的概率，即测量值落在 $(m-\sigma, m+\sigma)$ 区间内的概率 P，由定积分计算得出，其值为 $P=68.3\%$. 如将区间扩大到 2 倍，则 x 落在 $(m-2\sigma, m+2\sigma)$ 区间中的概率为 95.4%；x 落在 $(m-3\sigma, m+3\sigma)$ 区间中的概率为 99.7%. 当 $n\to\infty$ 时，测量标准差的绝对值大于 3σ 的概率仅为 0.3%，对于有限次测量，这种可能性是微乎其微的，因此可以认为是测量失误，或者说该测量值是“异常值”，应予以剔除. 在分析多次测量的数据时，这是很有用的 3σ 判据.

服从正态分布的随机误差有如下特征：

单峰性　绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大.

对称性　绝对值相等的正误差和负误差出现的几率相等.

有界性　绝对值很大的误差出现的概率近于零.

抵偿性　随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而减小，最后趋近于零.

2. 算术平均值

大多数随机误差具有抵偿性，即测量次数足够多时，正、负误差之和的绝对值近似相等，因此，用多次测得值的算术平均值作被测量的估值，能减少随机误差的影响. 设对同一量重复测了 n 次，一般应使 $n\geqslant 6$，测得值为 x_i，算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{1.1.4}$$

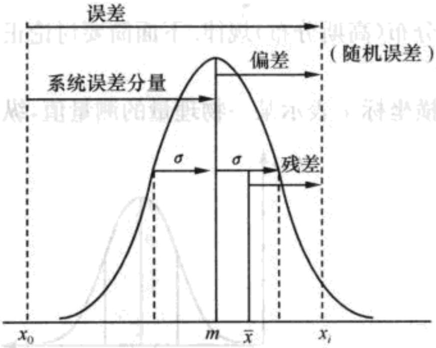


图 1.1.2　随机误差分布曲线

3. 残差、偏差和误差

图 1.1.2 随机误差分布曲线中，x_0 是被测量的真值，m 是总体平均值，$\bar{x}$ 是有限次测量的平均值，x_i 是单次测得值.

残差：单次测得值 x_i 与测量平均值 $\bar{x}$ 之差，即

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}\quad (i = 1, 2, \cdots, n)$$

偏差：单次测得值 x_i 与总体平均值 m 之差，偏差就是随机误差(分量). 当系差为零时，偏差才是误差.

误差：单次测得值 x_i 与被测量真值 x_0 之差.

4. σ、S 和 $S_{\bar{x}}$

1) 总体标准偏差 σ

不考虑系差分量时，σ 称为标准误差. σ 不是测量值中任何一个具体测量值的随机误差. σ 的大小只说明在一定条件下等精度测量列随机误差的概率分布情况. 在该条件下，任一单次测量值的随机误差，一般都不等于 σ，但却认为这一系列测量中所有测量值都属于同一个标准偏差 σ 的概率分布. 在不同条件下，对同一被测量进行两个系列的等精度测量，其标准偏差 σ 也不相同. 已经知道

$$\sigma = \lim_{n\to\infty}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - m)^2}{n}} \tag{1.1.5}$$

m 为 $n\to\infty$ 时的总体平均值. 不考虑系差分量时，它就是真值. 由于实验中不可能出现 $n\to\infty$，故 m 是一个理想值，因此 σ 也是一个理论值. 所谓置信概率 P 为 68.3% 也是一个理论值.

2) 实验标准偏差 S(或 S_x)

由于实验中测量次数总是有限的，在大学物理实验中，通常取 $5\leqslant n\leqslant 10$，因此我们实际应用的都是这种情况下的单次测量值的标准偏差公式，即贝塞尔公式

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{1.1.6}$$

S 是从有限次测量中计算出来的总体标准偏差 σ 的最佳估计值，称为实验标准差. 它表征随机误差引起测得值 x_i 的分散性. S 大表示测得值分散，随机误差的分布范围宽，精密度低；S 小表示测得值密集，随机误差的分布范围窄，精密度高.

3) 平均值的实验标准偏差 $S_{\bar{x}}$

如果在相同条件下，对同一量作多组重复的系列测量，则每一系列测量都有一个平均值. 由于随机误差的存在，各个测量列的平均值也不相同. 它们围绕着被测量的真值(设系差分量为零)有一定的分散. 此分散说明了平均值的不可靠性，而平均值的实验标准偏差 $S_{\bar{x}}$ 则是表征同一被测量的各个测量列平均值分散性的参数，可作为平均值不可靠性的评定标准. 由概率论可以证明

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \tag{1.1.7}$$

我们可以这样来理解：由于平均值已经对单次测量的随机误差有一定的抵消，因而这些平均值就更接近真值，它们的随机误差分布离散就会小得多，所以平均值的实验标准偏差要比单次测量值的实验标准差小得多.

1.2 直接测量结果不确定度的估算

1.2.1 不确定度的概念

前面我们明确了误差的概念，了解了什么是系统误差、随机误差以及系统误差中有已定系差和未定系差之分. 但是误差是一个理想的概念，它本身是不确定的. 根据误差的定义，由于真值一般不可能准确地知道，因而测量误差也不可能确切获知. 既然误差无法按其定义式精确求出，那么现实可行的办法就只能根据测量数据和测量条件进行推算(包括统计推算和其他推算)，去求得误差的估计值. 显然，由于误差是未知的，因此不应再将任何一个确定的已知值称作误差. 误差的估计值或数值指标应采用另一个专门名称，这个名称就是不确定度.

引入不确定度可以对测量结果的准确程度做出科学合理的评价. 不确定度越小，表示测量结果与其真值越靠近，测量结果越可靠. 反之，不确定度越大，测量结果与真值的差别越大，测量的质量越低，它的可靠性越差，使用价值就越低.

不确定度(uncertainty of measurement)是表征被测量的真值所处的量值散布范围的评定. 它表示由于测量误差的存在而对被测量值不能确定的程度. 不确定度 U 反映了可能存在的误差分布范围，即随机误差分量和未定系差分量的联合分布范围. 它可近似理解为一定概率的误差限值，理解为误差分布基本宽度的一半. 误差一般在 $\pm U$ 之间，在 $\pm U$ 之外的概率很小.

例如，氢原子光谱实验中，测得 H_α 在 15℃时的波长为 $\lambda_{H_\alpha}=(656.24\pm0.06)$nm，测量不确定度为 0.06nm，说明波长真值一般在 656.18～656.30nm 之间，量值 656.24 的误差一般在 −0.06～0.06. 将文献中的高度准确测得值 656.2816nm 作为约定真值，实验值的测量误差为 −0.04nm.

实验数据处理时人们通常先作误差分析，修正已定系差，必要时谨慎地剔除高度异常值，然后再评定不确定度.

不确定度和误差是两个不同的概念. 误差是指测量值与真值之差，一般情况下，它是未知的、确定的和可正可负的量；不确定度是表示误差可能存在的范围，它的大小可按一定的方法计算(或估计)出来，其值永远为正值. 另外，不确定度和误差都是由测量过程的不完善引起的，而且不确定度表示和评定体系是在现代误差理论的基础上建立和发展起来的. 在估算不确定度时，用到了描述误差分布的一些特征参量，因此两者不是割裂的，也不是对立的.

1.2.2 直接测量结果的不确定度估算

不确定度的评定方法是一个比较复杂的问题，其表示形式和合成方法也不只一种类型(规范的不确定度表示形式有两种：合成标准不确定度和扩展不确定度)，还在不断研究和发展中. 在物理实验教学中，我们采用简化的、可能有一定近似性的不确定度评定方法. 当然这一方法借鉴了某些工业化国家不确定度评定标准，也符合国家技术规范精神. 评定

方法的要点如下：

1. 结果表示中采用扩展不确定度U

结果表示中一律采用扩展不确定度U用于测量结果的报告. 扩展不确定度也称报告不确定度. 对于某个被测量x的直接测量结果$x=\bar{x}\pm U$表达式，表示真值在区间$(\bar{x}-U, \bar{x}+U)$内的可能性(概率)约等于或大于95%. 实验教学中，"扩展不确定度"有时简称为"不确定度".

2. 扩展不确定度分为A、B两类分量

扩展不确定度从评定方法上分为两类：A类分量U_A，是(多次重复测量时)用统计学方法计算的分量；B类分量U_{jB}，$j=1,2,\cdots$，是用其他方法(非统计学方法)评定的分量，这两类分量用方和根法合成

$$U=\sqrt{U_A^2+\sum_j (U_{jB})^2} \tag{1.2.1}$$

3. A类分量U_A的计算

重复测量次数为n时，U_A由实验标准偏差S乘以因子$(t/\sqrt{n})$来求得，即

$$U_A=\frac{t}{\sqrt{n}}S \tag{1.2.2}$$

式中，S为用贝塞尔公式(1.1.6)算出来的标准偏差，t为在一定置信概率P时，与测量次数n有关的因子(称t分布因子). 测量次数n确定后，置信概率为0.95的因子$t_{0.95}$或$(t/\sqrt{n})$的值由表1.2.1查出.

表1.2.1 计算A类不确定度的因子表($P=0.95$)

测量次数n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	∞
$t_{0.95}$的值	12.7	4.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.36	2.31	2.26	2.14	2.09	1.96
$t/\sqrt{n}$的值	8.98	2.48	1.59	1.24	1.05	0.93	0.84	0.77	0.72	0.55	0.47	$1.96/\sqrt{n}$
$t/\sqrt{n}$的近似值	9.0	2.5	1.6	1.2	$5<n\leqslant 10$，概率$P>0.94$时简化取$(t/\sqrt{n})\approx 1$						$(t/\sqrt{n})\approx 2/\sqrt{n}$	

(1.2.2)式的导出过程比较复杂，它本来还要求随机误差满足一定的分布规律. 在要求不太高的测量和教学实验中，可直接使用(1.2.2)式求U_A. 量值x取n次测量的平均值$\bar{x}$后，当系差为零时，其位于区间$(\bar{x}-U, \bar{x}+U)$内的可能性即概率约为95%. 换句话说，平均值与真值之差在$-U\sim U$的概率约为95%.

针对物理实验中测量次数n小于10，大于5的具体情况，因子$(t/\sqrt{n})\approx 1$，A类不确定度U_A可近似取标准偏差S的值

$$U_A=\frac{t}{\sqrt{n}}S\approx 1S \quad (5<n\leqslant 10) \tag{1.2.3}$$

上式是限定条件下的简化处理，不具普遍性. 一般情况下用查表所得的因子值由

(1.2.2)式计算 U_A.

4. B类分量 U_B 的估计与 U 的计算

B类分量 U_B 的估计是测量不确定度评定中的难点.由于引起 U_B 分量的误差成分与未定系差相对应,而未定系差可能存在于测量过程的各个环节中,因此 U_B 分量通常也是多项的.在 U_B 分量的估算中要不重复、不遗漏地详尽分析产生B类不确定度的来源,尤其是不遗漏那些对测量结果影响较大的或主要的不确定度来源,就有赖于实验者的学识和经验以及分析判断能力.

由于测量总要使用仪器,仪器生产厂家给出的仪器误差限值或最大允差,实际上就是一种未定系差,因此仪器误差是引起不确定度的一个基本来源.从物理实验教学的实际出发,我们只要求掌握由仪器误差引起的不确定度 U_B 分量的估算方法.

未定系差与随机误差既有区别又具有共同的特性.在测量条件不变的多次重复测量中,其取值不变,为一恒定的误差而不具有抵偿性,这是未定系差有别于随机误差的基本特征.但在随机地改变某些条件时,其取值又具有随机性,即具有与随机误差类似的特征.由于这种类似的特征,通常将未定系差也视作随机变量,并认为在其极限误差($-\Delta_{max}$, Δ_{max})范围内服从某一概率分布.其分布规律与误差因素的变化有关,也与测量条件的变化有关,而实际上往往很难求得.目前对于未定系差的概率分布,主要是根据经验资料的分析与判断来确定,大都采用两种分布假设:一种是正态分布;另一种是均匀分布.

根据所假设的某一概率分布,并已知其极限误差 Δ_{max},既可求得该分布的特征参量——近似标准偏差.近似标准偏差 u 可按下式求得

$$u=\frac{\Delta_{max}}{k}=\frac{\Delta_{仪}}{k} \tag{1.2.4}$$

式中,k 称为置信系数(或置信因子),对于正态分布,$k=3$;对于均匀分布,$k=\sqrt{3}$.

必须指出,近似标准偏差 u 与随机误差的标准偏差 S 在获得方法上是有重要区别的.S 是通过一系列实际测量数据用统计方法计算出来的,它是理论标准误差 σ 的一个估计值.而 u 不能按统计方法计算得出,而是根据某种假设的概率分布,并按(1.2.4)式求出.由于假设的分布总是实际分布的一种近似的估计,故近似标准偏差 u 的获得方法在一定程度上带有主观判断的性质,而标准偏差 S 却具有一定的客观性.

基于上述认识,在直接测量中,B类分量 U_B 近似取仪器误差限值 $\Delta_{仪}$,即认为 U_B 主要由仪器的误差特性决定,因此,我们可以进一步简化取

$$U_B=\Delta_{仪} \tag{1.2.5}$$

教学中的仪器误差限值 $\Delta_{仪}$ 一般取仪表、器具的最大允差(或示值误差限、基本误差限)的绝对值.它们可参照国家标准规定的计量仪表、器具的准确度等级或允许误差范围得出,或由厂家的产品说明书给出,或由实验室结合具体情况,给出 $\Delta_{仪}$ 的近似约定值.

例如,电表的误差可分为基本误差和附加误差.电表的附加误差在物理实验中考虑起来比较困难,故我们约定在实验教学中一般只取基本误差限,因此按下式简化计算 $\Delta_{仪}$

$$\Delta_{仪}=k\%\times 量程$$

式中，k 为国家标准规定的准确度等级.

现将某些常用的量具和实验仪器的允差列于表 1.2.2 中.

表 1.2.2　某些常用实验仪器的允差

仪器名称	量　程	分度值	允　差
钢板尺	150mm	1mm	±0.10mm
	500mm	1mm	±0.15mm
	1000mm	1mm	±0.20mm
钢卷尺	1m	1mm	±0.8mm
	2m	1mm	±1.2mm
游标卡尺	125mm	0.02mm	±0.02mm
		0.05mm	±0.05mm
螺旋测微器(千分尺)	0～25mm	0.01mm	±0.004mm
七级天平(物理天平)	500g	0.05g	综合误差：满量程 0.08g 1/2 量程 0.06g 1/3 量程 0.7mg
三级天平(分析天平)	200g	0.1mg	综合误差：满量程 1.3mg 1/2 量程 1.0mg 1/3 量程 0.7mg
普通温度计(水银或有机溶剂)	0～100℃	1℃	±1℃
精密温度计(水银)	0～100℃	0.1℃	±0.2℃
电表(0.5 级)			0.5%×量程
电表(1.0 级)			1.0%×量程
数字万用电表			$\alpha\%\cdot U_x+\beta\%\cdot U_m$ 其中 U_x 表示测量值即读数，U_m 表示量程，α 和 β 对不同的测量功能有不同的数值. 通常将 $\beta\%\cdot U_m$ 用"字数"表示，如"两个字"等

物理实验中直接测量的 B 类分量通常只考虑一项 U_B，不确定度 U 用下式计算

$$U=\sqrt{U_A^2+U_B^2}=\sqrt{\left(\frac{t}{\sqrt{n}}\right)^2 S^2+\Delta_{仪}^2} \tag{1.2.6}$$

5. 单次测量的不确定度

在单次测量中，不能用统计方法求标准偏差和 U_A，而测量的随机分布特征是客观存在的，不随测量次数的不同而变化. 但是，通常在下列情况：①已知 S 显著小于 $\Delta_{仪}/2$；②评定出的 U_A 对最后结果的不确定度影响很小；③因条件限制而只测了一次，不确定度可更为简单地取

$$U=\Delta_{仪} \tag{1.2.7}$$

应该强调的是，这只是一个很近似或粗略的估算方法，并不能由此得出结论："单次测量的不确定度 U 小于多次测量的不确定度 U."

在特殊情况下还可估计一个"误差限"作为 U_B，即作为单次测量的不确定度 U. 例如，用 0.1s 分度的秒表计时，由于人的感官灵敏度的限制与技术上的不熟练，造成"启动"和

"停止"秒表的时间超过 0.1s，这必然使测量误差限超出秒表的仪器误差限. 这时可依实际情况用 $\Delta_{估}$ 来估计误差限值，比如取 $\Delta_{估}$ 等于 0.2s. 又如，用钢卷尺测量比较长的距离，不可能保证钢卷尺拉平拉直，则可依实际情况确定 $\Delta_{估}$ 为 5mm 或更大.

1.2.3 直接测量结果的表示

由于测量过程中不可避免地会出现误差，因此伴随着测量结果总是存在一定的不确度，所以一个没有标明不确定度的测量结果是没有科学价值的. 前面已经讨论了不确定度 U 的估算，现在可以把一个直接测量结果表示为

$$Y = y \pm U(\text{单位}) \tag{1.2.8}$$

式中，不计已定系差时，被测量值 y 可以取多次测量的算术平均值 $\bar{y}$；若只测了一次，y 就取单次测得值 y_1. 如有已定系差，还须按(1.1.3)式将测得值或其平均值减去已定系差，得到 y 的值. 上式表示：被测量 Y 的真值位于区间$(y-U, y+U)$的概率约为 95%.

综上所述，要完整地表示一个测量结果，应该有被测量的数值、单位和不确定度三个要素.

为了更直观地评价测量结果的准确度，常用相对扩展不确定度 U_r 的概念，它是扩展不确定度 U 与量值 y 之比，即

$$U_r = \frac{U}{y} \tag{1.2.9}$$

这里需说明：

(1) 由于不确定度本身只是一个估计值，因此，在一般情况下，表示最后结果的不确定度只取一位有效数字，最多不超过两位. 在本实验课程中，不确定度 U 一般取一位有效数字，相对不确定度 U_r 一般取两位有效数字.

(2) 在科学实验或工程技术中，有时不要求或不可能明确标明测量结果的不确定度，这时常用有效数字粗略表示出测量的不确定度，即测量值有效数字的最后一位表示不确定度的所在位. 因此测量记录时要注意有效数字的位数，不能随意增减.

1.3 间接测量结果不确定度的合成

间接测量中，待测量是由若干直接测量的物理量通过函数关系运算而得到的. 由于直接测量量存在误差和不确定度，显然，由直接被测量经过运算而得到的间接被测量也必然存在误差和不确定度，这就叫做误差的传递或不确定度的传递. 两者的传递公式不同，下面将分别讨论.

1.3.1 极限误差(仪器误差)的传递公式

设间接被测量为 Y，有 k 个直接被测量，分别为 $X_1, X_2, \cdots, X_k$，它们之间的函数关系为

$$Y = f(X_1, X_2, \cdots, X_k) \tag{1.3.1}$$

式中，$X_1, X_2, \cdots, X_k$ 为彼此独立的直接被测量．函数 f 的全微分表达式为

$$dY = \sum_{j=1}^{k} \frac{\partial f(X_j)}{\partial X_j} dX_j \tag{1.3.2}$$

由于各直接被测量的误差 ΔX_j 都是微小量，可以用来近似代替各微分量 dX_j，故上式可写成

$$\Delta Y = \sum_{j=1}^{k} \frac{\partial f(X_j)}{\partial X_j} \Delta X_j \tag{1.3.3}$$

上式为测量误差的一般传递公式，表明间接被测量的误差 ΔY 是各直接被测量的误差 ΔX_j 与相应误差传递系数 $\frac{\partial f(X_j)}{\partial X_j}$ 乘积的代数和．

在进行实验设计时，往往事先要进行误差估算，以便正确地选取测量仪器和测量方法．此外，有时我们实验中所用仪器准确度等级较低，仪器误差中已定系差占主要成分，且又未进行检定和修正．在这种情况下，通常用 $\Delta_{仪}$ 来估计各直接被测量的误差范围，并用(1.3.3)式进行误差传递的估算．由于 $\Delta_{仪}$ 的符号并不确定，为谨慎起见，通常作最不利的情况考虑，将(1.3.3)式各项取绝对值相加，即

$$\Delta Y = \sum_{j=1}^{k} \left| \frac{\partial f(X_j)}{\partial X_j} \Delta X_j \right| \tag{1.3.4}$$

上式称为极限误差(或仪器误差)的传递公式，显然上述估算方法会夸大测量结果的误差，但在实验设计时常用这种方法对测量误差进行粗略估算．

1.3.2　测量不确定度的传递公式

由测量误差的一般传递(1.3.3)式，进而可得标准差 S_y 的方和根合成式

$$S_y = \sqrt{\sum_{j=1}^{k} \left(\frac{\partial f(X_j)}{\partial X_j} S_{X_j} \right)^2} \tag{1.3.5}$$

在各直接测量量 X_j 的误差特性互相独立的前提下，标准差传递公式(1.3.5)在数学上是严密的．从上式出发人们公认：Y 的一种以标准差形式表示的不确定度，其合成(传递)公式形同(1.3.5)式，考虑到基础物理实验课程的特殊性，我们采用和(1.3.5)式同形的扩展不确定度传递的近似公式，即

$$U_Y = \sqrt{\sum_{j=1}^{k} \left(\frac{\partial f(X_j)}{\partial X_j} U_{X_j} \right)^2} \tag{1.3.6}$$

式中，U_{X_j} 为各直接测量量 X_j 的扩展不确定度．

间接测量中，当函数 $f(X_j)$ 中各量之间是和差关系时，用(1.3.6)式计算 U_Y 是方便的；当函数 $f(X_j)$ 中各量之间是积商关系时，宜改用相对不确定度的合成(传递)公式

$$\frac{U_Y}{Y} = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial \ln f}{\partial X_j} \right)^2 U_{X_j}^2} \tag{1.3.7}$$

一些常用函数的不确定度传递公式如表 1.3.1 所示．

表 1.3.1　常用函数的不确定度传递公式

函数表达式	测量不确定度传递公式
$Y=X_1\pm X_2$	$U_Y=\sqrt{U_{X_1}^2+U_{X_2}^2}$
$Y=X_1X_2$ 或 $Y=\dfrac{X_1}{X_2}$	$\dfrac{U_Y}{Y}=\sqrt{\left(\dfrac{U_{X_1}}{X_1}\right)^2+\left(\dfrac{U_{X_2}}{X_2}\right)^2}$
$Y=kX$	$U_Y=kU_X$
$Y=X^{\frac{1}{k}}$	$\dfrac{U_Y}{Y}=\dfrac{1}{k}\cdot\dfrac{U_X}{X}$
$Y=\dfrac{X_1^k\cdot X_2^m}{X_3^n}$	$\dfrac{U_Y}{Y}=\sqrt{k^2\left(\dfrac{U_{X_1}}{X_1}\right)^2+m^2\left(\dfrac{U_{X_2}}{X_2}\right)^2+n^2\left(\dfrac{U_{X_3}}{X_3}\right)^2}$
$Y=\sin X$	$U_Y=\lvert\cos X\rvert\cdot U_X$
$Y=\ln X$	$U_Y=\dfrac{U_X}{X}$

1.3.3　间接测量结果不确定度的评估

1. 间接测量结果不确定度的计算步骤

(1) 先求出各直接测量量的平均值、不确定度的 A、B 两类分量，再求出各直接测量量的不确定度 U_{X_j}.

(2) 根据 Y 和 X_j 的函数关系式写出 Y 的全微分表达式(1.3.2).

(3) 用(1.3.6)式或(1.3.7)式计算 Y 的不确定度 U_Y 或 U_Y/Y. 注意：用(1.3.6)式作不确定度的方和根合成时，**如果某一分量小于最大分量(或合成结果)的 1/5 到 1/6，就可将这一分量看成是可忽略的微小分量而删除.**

2. 间接测量结果的表示

间接测量结果的表示方法与直接测量类似，写成以下形式：

$$Y=y\pm U_Y(\text{单位})$$

$$U_r=\frac{U_Y}{y}$$

式中，y 为间接测量量的最佳估值，由各直接测量的最佳估值(平均值)代入函数关系式求得. 不确定度的取位原则与直接测量不确定度的取位原则一样.

例 1　用游标精度为 0.02mm 的游标卡尺测量圆柱体的外径 D 和高 H，所得数据如表 1.3.2 所示，求圆柱体的体积 V 和不确定度 U_V，并写出测量结果表达式.

表 1.3.2　游标卡尺测量圆柱体的外径 D 和高 H 数据表

次　数	D/cm	H/cm	次　数	D/cm	H/cm
1	6.004	8.096	3	6.006	8.092
2	6.002	8.094	4	6.000	8.096

续表

次 数	D/cm	H/cm	次 数	D/cm	H/cm
5	6.006	8.096	8	6.004	8.098
6	6.000	8.094	9	6.000	8.094
7	6.006	8.094	10	6.000	8.096

解 (1) 由测量数据可计算出平均值及测量列的标准偏差(即测量不确定度的 S 分量)分别为

$$\overline{D} = \frac{1}{n}\sum D_i = 6.0028\text{cm}$$

$$S_D = \sqrt{\frac{\sum (D_i - \overline{D})^2}{n-1}} = 0.0027\text{cm}$$

$$\overline{H} = \frac{1}{n}\sum H_i = 8.0950\text{cm}$$

$$S_H = 0.0017\text{cm}$$

(2) 游标卡尺示值误差限为 0.02mm,可得 B 类不确定度分量

$$U_B \approx \Delta_{仪} = 0.002\text{cm}$$

(3) 直接测量量的合成不确定度

$$U_D = \sqrt{S_D^2 + U_B^2} = \sqrt{(2.7\times10^{-3})^2 + (2.0\times10^{-3})^2} = 3.4\times10^{-3} = 0.004(\text{cm})$$

$$U_H = \sqrt{S_H^2 + U_B^2} = \sqrt{(1.7\times10^{-3})^2 + (2.0\times10^{-3})^2} = 2.6\times10^{-3} = 0.003(\text{cm})$$

(4) D 和 H 的测量结果表达式

$$D = \overline{D} \pm U_D = (6.0028 \pm 0.0034) = (6.003 \pm 0.004)\text{cm}$$

$$U_r(D) = \frac{U_D}{D}\times100\% = 0.067\%$$

$$H = \overline{H} \pm U_H = (8.0950 \pm 0.0026) = (8.095 \pm 0.003)\text{cm}$$

$$U_r(H) = 0.037\%$$

(5) 圆柱体的体积为

$$\overline{V} = \frac{\pi}{4}\overline{D}^2\overline{H} = \frac{1}{4}\times3.1416\times(6.003)^2\times8.095 = 229.11(\text{cm}^3)$$

圆柱体体积的测量不确定度为

$$U_V = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial D}\right)^2 U_D^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial H}\right)^2 U_H^2}$$

不确定度传递系数分别为

$$\frac{\partial V}{\partial D} = \frac{\partial}{\partial D}\left(\frac{\pi}{4}D^2H\right) = \frac{\pi}{2}DH = \frac{1}{2}\times3.14\times6.0\times8.1 = 76(\text{cm}^2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial H} = \frac{\partial}{\partial H}\left(\frac{\pi}{4}D^2H\right) = \frac{\pi}{4}D^2 = \frac{1}{4}\times3.14\times(6.0)^2 = 28(\text{cm}^2)$$

因此

$$U_V = \sqrt{(76\times0.004)^2 + (28\times0.003)^2} = 0.32 = 0.4(\text{cm}^3)$$

体积不确定度 U_V 的计算也可以直接利用常用函数不确定度的传递公式

$$Y = x_1^k x_2^m$$

$$U_Y = Y \cdot \sqrt{k^2\left(\frac{U_{x_1}}{x_1}\right)^2 + m^2\left(\frac{U_{x_2}}{x_2}\right)^2}$$

本例相应为

$$U_V = \overline{V} \cdot \sqrt{2^2\left(\frac{U_D}{D}\right)^2 + \left(\frac{U_H}{H}\right)^2} = 229.1 \times \sqrt{4 \times \left(\frac{0.004}{6.0}\right)^2 + \left(\frac{0.003}{8.1}\right)^2}$$

$$= 229.1 \times 1.38 \times 10^{-3} = 0.32 = 0.4(\text{cm}^3)$$

(6) 测量结果表达式

$$V = \overline{V} \pm U_V = (229.1 \pm 0.4)(\text{cm}^3)$$

$$U_r(V) = \frac{U_V}{\overline{V}} \times 100\% = \frac{0.4}{229.1} \times 100\% = 0.17\%$$

例 2 已知金属圆环的外径 $D_2=(3.600\pm0.004)$cm，内径 $D_1=(2.880\pm0.004)$cm，高度 $h=(2.575\pm0.004)$cm，求圆环的体积 V 和不确定度 U_V.

解 圆环体积为

$$V = \frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_1^2)h = \frac{\pi}{4} \times (3.600^2 - 2.880^2) \times 2.575 = 9.436(\text{cm}^3)$$

圆环体积的对数及其微分式为

$$\ln V = \ln\frac{\pi}{4} + \ln(D_2^2 - D_1^2) + \ln h$$

$$\frac{\partial \ln V}{\partial D_2} = \frac{2D_2}{D_2^2 - D_1^2}, \quad \frac{\partial \ln V}{\partial D_1} = -\frac{2D_1}{D_2^2 - D_1^2}, \quad \frac{\partial \ln V}{\partial h} = \frac{1}{h}$$

代入(1.3.7)式，则

$$\left(\frac{U_V}{V}\right)^2 = \left(\frac{2D_2}{D_2^2 - D_1^2}\right)^2 U_{D_2}^2 + \left(\frac{2D_1}{D_2^2 - D_1^2}\right)^2 U_{D_1}^2 + \left(\frac{1}{h}\right)^2 U_h^2$$

$$= \left(\frac{2 \times 3.600 \times 0.004}{3.600^2 - 3.880^2}\right)^2 + \left(\frac{2 \times 2.880 \times 0.004}{3.600^2 - 3.880^2}\right)^2 + \left(\frac{0.004}{2.575}\right)^2$$

$$= (38.1 + 24.4 + 2.4) \times 10^{-6} = 64.9 \times 10^{-6}$$

因此

$$U_r(V) = \frac{U_V}{V} = (64.9 \times 10^{-6})^{\frac{1}{2}} = 0.0081 = 0.81\%$$

$$U_V = V \cdot \frac{U_V}{V} = 9.436 \times 0.0081 = 0.076 = 0.08(\text{cm}^3)$$

故环的体积为

$$V = (9.44 \pm 0.08)(\text{cm}^3)$$

1.4 有效数字及其运算规则

由于物理测量中总存在误差，因而直接测得量的数值只能是一个近似数并具有某种不确定性，由直接测得量通过计算求得的间接测量量也是一个近似数，而测量不确定度决

定了测量值的数字只能是有限位数，不能随意取舍. 因此，在物理测量中，必须按照下面介绍的“有效数字”的表示方法和运算规则来正确表达和计算测量结果.

1.4.1　测量结果的有效数字

1. *有效数字的定义及其基本性质*

任何测量仪器总存在仪器误差，在仪器设计中应使仪器标尺和最小分度值与仪器误差的数值相适应，两者基本上保持在同一数位上. 由于受到仪器误差的制约，在使用仪器对被测量进行测量读数时，只能读到仪器的最小分度值，然后在最小分度值以下还可再估读一位数字. 从仪器刻度读出的最小分度值的整数部分是准确的数字，称为可靠数字；而在最小分度以下估读的末位数字，一般也就是仪器误差或相应的仪器不确定度所在的那一位数字，它具有不确定性，其估读会因人而异，通常称为可疑数字. 据此我们定义：*测量结果中所有可靠数字加上末位的可疑数字统称为测量结果的有效数字*. 有效数字具有以下基本特性：

(1) 有效数字的位数与仪器精度(最小分度值)有关，也与被测量的大小有关.

对于同一被测量，如果使用不同精度的仪器进行测量，则测得的有效数字的位数是不同的. 例如，用千分尺(最小分度值 0.01mm，$\Delta_{仪}=0.004$mm)测量某物体的长度读数为 4.834mm. 其中前三位数字“483”是最小分度值的整数部分，是可靠数字，末位“4”是在最小分度值内估读的数字，为可疑数字，它与千分尺的 $\Delta_{仪}$ 在同一数位上，所以该测量值有四位有效数字. 如果改用最小分度值(游标精度)为 0.02mm 的游标尺来测量，其读数为 4.84mm，测量值就只有三位有效数字. 游标卡尺没有估读数字，其末位数字“4”为可疑数字，它与游标卡尺的 $\Delta_{仪}=0.02$mm 也是在同一数位上的.

有效数字的位数还与被测量本身的大小有关. 若用同一仪器测量大小不同的被测量，其有效数字的位数不相同. 被测量越大，测得结果的有效数字位数也就越多.

(2) 有效数字的位数与小数点的位置无关，单位换算时有效数字的位数不应发生变化.

例如，重力加速度 $980\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$、$9.80\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 或 $0.00980\text{km}\cdot\text{s}^{-2}$ 都是三位有效数字. 也就是说，采用不同单位时，小数点的位置移动而使测量值的数值大小不同，但测量值的有效数字位数不变. 必须注意：用以表示小数点位置的“0”不是有效数字，“0”在数字中间或数字后面都是有效数字，不能随意增减.

2. *有效数字与不确定度的关系*

前面已讨论过，有效数字的末位是估读数字，存在不确定性. 在我们规定不确定度的有效数字只取一位时，任何测量结果，其数值的最后一位应与不确定度所在的那一位对齐，如在 1.3 节计算圆环体积的例子中，$V=(9.44\pm0.08)\text{cm}^3$，测量值的末位“4”刚好与不确定度 0.08 的“8”对齐. 如果写成 $V=(9.436\pm0.08)\text{cm}^3$ 或 $V=(9.44\pm0.076)\text{cm}^3$，就是错误的.

由于有效数字的最后一位是不确定度所在位，因此有效数字或有效位数在一定程度

上反映了测量值的不确定度(或误差限值). 测量值的有效数字位数越多,测量的相对不确定度越小;有效数字位数越少,相对不确定度就越大. 一般来说,两位有效数字对应于$10^{-1}\sim10^{-2}$的相对不确定度;三位有效数字对应于$10^{-2}\sim10^{-3}$的相对不确定度,依次类推. 可见,有效数字可以粗略地反映测量结果的不确定度.

3. *数值的科学表示法*

由于单位选取不同,有时会出现测量值的数值很大或很小,而有效数字的位数又不多的情况,这时数值大小与有效位数就可能发生矛盾. 例如,138cm=1.38m 是正确的,若写成138cm=1380mm 则是错误的. 为了解决这个矛盾,通常采用科学表示法,即用有效数字乘以10 的幂指数的形式来表示,如 $138\text{cm}=1.38\times10^3\text{mm}$, $9.80\text{m}\cdot\text{s}^{-2}=9.80\times10^{-3}\text{km}\cdot\text{s}^{-2}$. 又如,某人测得真空中的光速为 $299700\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$,不确定度为 $300\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$,这个结果写成$(299700\pm300)\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$显然是不妥的,应写成$(2.997\pm0.003)\times10^5\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$,表示不确定度取一位,测量值的有效数字为四位,测量值的最后一位与不确定度对齐.

1.4.2 有效数字的运算规则

间接测量量是由直接测量量经过一定函数关系计算出来的. 而各直接测量量的大小和有效数字位数一般都不相同,这就使计算过程变得繁复,计算结果可能出现冗长的不合理的数字位数. 此外,间接测量结果的不确定度也是由各直接测量结果的不确定度通过不确定度传递公式求出来的,计算中也会出现类似的情况.

为了简化运算过程,在进行运算以前,需要对各直接测量量的有效数字进行适当的取位和数值的进舍修约,这就必须建立并遵守一定的数值进舍规则和运算规则. *数字的修约、变换、运算不应增大测量值最后结果的不确定度,这是一条基本原则.*

1. *数值的舍入修约规则*

测量值的数字的舍入,首先要确定需要保留的有效数字和位数,保留数字的位数确定以后,后面多余的数字就应予以舍入修约,其规则如下:

(1) 拟舍弃数字的最左一位数字小于 5 时,则舍去,即保留的各位数字不变.

(2) 拟舍弃数字的最左一位数字大于 5,或者是 5 而其后跟有并非为 0 的数字时,则进一,即保留的末位数字加 1.

(3) 拟舍弃数字的最左一位数字为 5,而右面无数字或皆为 0 时,若所保留的末位数字为奇数则进一,为偶数或 0 则舍弃,即"单进双不进".

上述规则也称数字修约的偶数规则,即"四舍六入五凑偶"规则.

根据上述规则,要将下列各数据保留四位有效数字,舍入后的数据为

$$3.14159\rightarrow3.142,\quad 2.71729\rightarrow2.717$$
$$4.51050\rightarrow4.510,\quad 3.21550\rightarrow3.216$$
$$6.378501\rightarrow6.379,\quad 7.691499\rightarrow7.691$$

对于测量结果的不确定度的有效数字,本课程规定采取只进不舍的规则. 例如,1.3 节的实例中,体积的不确定度计算结果为 0.32cm^3,结果表示 $U_V=0.4\text{cm}^3$. 这里就是采用

进位法.

2. 有效数字运算规则

1) 加减法

设 $N=x+y+z$，运算过程为：

(1) 先计算不确定度，不确定度在运算过程中取两位，最后取一位；

(2) 计算 N，各分量位数取到和不确定度所在位相同或比不确定度所在位低一位；

(3) 用不确定度决定最后结果的有效数字.

例1　求 $N=A+B-C$. 其中 $A=(98.7\pm0.3)\text{cm}$，$B=(6.238\pm0.006)\text{cm}$，$C=(14.36\pm0.08)\text{cm}$.

解　(1) $U_N=\sqrt{U_A^2+U_B^2+U_C^2}$，由于 $U_B \ll U_A$ 和 U_C，故在方和根合成时，U_B 可忽略. 所以

$$U_N=\sqrt{U_A^2+U_C^2}=\sqrt{0.3^2+0.08^2}=0.31=0.4\text{cm}$$

(2) $N=A+B-C=98.7+6.24-14.36=90.58\text{cm}$

因为不确定度在小数点后第一位上，故运算时各分量保留到小数点后第一位或第二位，N 也暂时多保留一位.

(3) $N=(90.6\pm0.4)\text{cm}$

如果各分量没有标明不确定度，则加减法的运算以各分量中估计位最高的，即不确定度最大的分量为准，其他各分量在运算过程中保留到它下面一位，最后再与它对齐.

上例中，A 分量的估计位最高，以它为准，其他各分量比它多保留一位.

$$N=98.7+6.24-14.36=90.58\text{cm}$$

最后与 A 分量的位数对齐，所以结果为 $N=90.6\text{cm}$

2) 乘除法

设 $N=xyz$，运算过程为：

(1) 以有效位数最少的分量为准，将各分量(包括常数)的有效数字取到比它多一位，计算 N，结果也暂时多保留一位；

(2) 计算不确定度；

(3) 由不确定度决定结果的有效数字位数.

例2　求 $D=\dfrac{g}{4\pi^2}RT^2$，其中，$R=(83.75\pm0.04)\times10^{-3}\text{m}$，$T=(1.24\pm0.01)\text{s}$，$g=9.794\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$.

解　(1) 各分量中，T 的有效数字最少(3位)，以它为准，R, g, π 都取四位，结果先保留四位.

$$D=\frac{g}{4\pi^2}RT^2=\frac{9.794\times83.75\times(1.24)^2}{4\times(3.142)^2}=31.94\times10^{-3}(\text{m}^2)$$

(2) 计算不确定度，应用不确定度传递公式

$$\frac{U_D}{D}=\sqrt{\left(\frac{U_R}{R}\right)^2+2^2\times\left(\frac{U_T}{T}\right)^2}=\sqrt{\left(\frac{0.04}{83.75}\right)^2+4\times\left(\frac{0.01}{1.24}\right)^2}=0.017$$

$$U_D = D \times \frac{U_D}{D} = 31.94 \times 10^{-3} \times 0.017 = 0.54 \times 10^{-3} = 0.6 \times 10^{-3}(\mathrm{m}^2)$$

(3) 结果为

$$D = (31.9 \pm 0.6) \times 10^{-3}\mathrm{m}^2$$

当测量数据没有给出不确定度时，计算同(1). 结果的有效数字位数一般取与各分量中有效数字位数最少者相同.

在运算中，遇到一些物理常数和纯数学数字（如$\sqrt{2}$，π 等），它们不影响运算结果的有效数字位数.

3. 函数运算的有效数字取值

对某一函数进行运算时，可以用微分方法求出该函数的误差公式，再将直接测量值的不确定度代入公式，以确定函数的有效位数. 若直接测量值没有标明不确定度，则在直接测量值的最后一位数取 1 作为不确定度代入公式.

下面举例说明上述函数运算的有效数字取位方法.

例 3 已知 $x=25.4$，求 $\ln x$.

解 对 $\ln x$ 求微分得误差公式为

$$\Delta(\ln x) = \frac{\Delta x}{x}$$

由于直接测量值 x 没有标明不确定度，故在直接测量值的最后一位数上取 1 作为不确定度，即 $\Delta x=0.1$，将 x、Δx 代入上式得

$$\Delta(\ln x) = 4 \times 10^{-3}$$

因此 $\ln x$ 的尾数应保留到小数点后三位，即

$$\ln x = \ln 25.4 = 3.235$$

一般情况下，对 x 的自然对数 $\ln x$，其尾数部分的位数与该数 x 的有效数字位数相同.

例 4 已知 $x=56°57'\pm1'$，求 $\sin x$.

解 对 $\sin x$ 求微分得出误差公式为

$$\Delta(\sin x) = \cos x \cdot \Delta x$$

将 x 用角度代入，Δx 化为弧度代入得

$$\Delta(\sin x) = \cos 56°57' \times \frac{\pi}{180} \times \frac{1}{60} = 1.5 \times 10^{-4}$$

所以 $\sin 56°57'=0.5454$ 为四位有效数字.

例 5 已知 $x=9.36\pm0.05$，求 e^x.

解 对 e^x 求微分得到 e^x 的误差公式为

$$\Delta(\mathrm{e}^x) = \mathrm{e}^x \cdot \Delta x$$

由于 e^x 的值一般比较大，因此在指数函数运算中的有效位数的取法是：先把 e^x 的值写成以 10 为底幂的指数形式，小数点前保留一位，再将 e^x 值代入上述误差公式，不计 10^n 的因子，即

$$x = 9.36,\quad e^x = 11614 = 1.1614 \times 10^4$$

代入公式得

$$\Delta(e^x) = 1.1614 \times 0.05 = 0.06$$

因此，$e^x = e^{9.36} = 1.16 \times 10^4$，为三位有效数字.

4. *常数和系数在运算中的有效数字规则*

对运算中的某些常数或者倍数，如 π，e，$\sqrt{2}$等，其有效位数是无限的，在实际计算中可比其他有效数字位数最多的多取一位.

必须指出，测量结果的有效数字位数的多少取决于测量，而不取决于运算过程. 因此在运算时，尤其是使用计算器时，不要随意扩大或减小有效数字位数，更不要认为算出结果的位数越多越好.

1.5 实验数据处理的一般方法

物理实验的目的和任务不只是对某一物理量进行测量，更重要的是找出各物理量之间的依赖关系和变化规律，以便确定它们的内在联系和函数关系. 对实验数据进行科学的分析和处理是实现上述目的的重要手段. 本节介绍几种实验数据处理的方法：列表法、作图法、逐差法和回归法.

1.5.1 列表法

直接从仪器或量具上读出的、未经任何数学处理的数据称为实验测量的原始数据，它是实验的宝贵资料，是获得实验结果的依据. 正确、完整地记录原始数据是顺利完成实验的重要保证.

在记录数据时，把数据列成表格形式，既可以简单而明确地表示出有关物理量之间的对应关系，便于分析和发现数据的规律性，也有助于检验和发现实验中的问题.

列表的具体要求：

(1) 表格设计合理，便于看出相关量之间的对应关系，便于分析数据之间的函数关系和数据处理.

(2) 标题栏中写明代表各物理量的符号和单位，单位不要重复写在每个测量数据之后. 若表内单位一致，则可在表格上方统一标出表中单位，或注明所采用的单位制，但表内数据一定要与该单位制相符.

(3) 表中所列数据要正确反映测量结果的有效数字.

(4) 实验室所给出的数据或查得的单项数据应列在表格的上部.

1.5.2 作图法

作图法是将一系列数据之间的关系或其变化情况用图线直观地表示出来，是一种最常用的数据处理方法. 它可以研究物理量之间的变化规律，找出对应的函数关系求取经验公式. 如果图线是依据许多测量数据点描述出来的光滑曲线，则作图法有多次测量取其平

均效果的作用;能简便地从图线上求出实验需要的某些结果,绘出仪器的校准曲线;在图线范围内可以直接读出没有进行观测的对应于某 x 的 y 值(即内插法),在一定条件下,也可以从图线的延伸部分读到测量范围以外无法测量的点的值(即外延法);由图线还可以帮助发现实验中个别的测量错误,并可通过图线进行系统误差分析.

虽然作图法具有简便、形象、直观等许多优点,但它只是一种粗略的数据处理方法. 因为它不是建立在严格的统计理论基础上且还受坐标纸及人为的影响. 尽管如此,作图法仍不失为一种重要而常用的数据处理方法.

1. 作图要求

1) 选用合适的坐标纸

应根据物理量之间的函数性质合理选用坐标纸的类型. 例如,函数关系为线性关系时选用直角坐标纸,为对数关系时可选用对数坐标纸.

2) 坐标轴的大小及坐标的比例

应根据测量数据的有效数字位数及测量结果的需要来确定. 原则上,数据中的可靠数字在图中也应是可靠的;数据中有误差的一位,即不确定度所在位,在图中应是估计的,即坐标中的最小格对应测量值可靠数字的最后一位.

以横轴代表自变量,纵轴代表因变量,并标明所代表的物理量名称(或符号)及单位.

按简单和便于读数的原则选择图上的读数与测量值之间的比例,一般选用 1∶1,1∶2,1∶5,2∶1 等为好. 用选好的比例,在坐标轴上等间距地、按图上所能读出的有效数字位数表示分度(坐标轴所代表的物理数值).

为使图线布局合理,应当合理选取比例,使图线比较对称地充满整个图纸,而不是偏向一边. 纵横两坐标轴的比例可以不同,坐标轴的起点也不一定从零开始. 对于数据特别大的或特别小的,则可以用数量级表示法,如 $\times10^{m}$ 或 $\times10^{-n}$,并放在坐标轴最大值的右边(或上方).

3) 标点与连线

根据测量数据,用削尖的铅笔在坐标纸上以“+”、“×”、“·”、“◦”等符号标出实验点. 应使各测量数据对应的坐标准确地落在所标符号的中心. 一条实验曲线用一种符号. 当一张图纸上要画几条曲线时,各条曲线应分别用不同的符号标记,便于区别.

各实验点的连线不能随手画,而要用直尺或曲线板等作图工具,根据不同情况把点连成直线或光滑曲线. 由于测量存在不确定度,因此图线并不一定通过所有的点,而要求数据点均匀地分布在图线两旁. 如果个别点偏离太大,应仔细分析后决定取舍或重新测定. 连线要细而清晰,连线过粗会因作图带来附加误差. 用来对仪表进行校准时使用的校准曲线要通过校准点连成折线.

4) 标注图名

作好实验图线后,应在图纸适当位置标明图线的名称,必要时在图名下方注明简要的实验条件.

2. 图解法求直线的斜率和截距

用作图法处理数据时，一些物理量之间为线性关系，其图线为直线，通过求直线的斜率和截距，可以方便地求得相关的间接测量的物理量.

1) 直线斜率的求法

若图线类型为直线方程 $y=a+bx$，可在图线上任取两相距较远的点，一般取在靠近直线两端的 $P_1(x_1,y_1)$ 和 $P_2(x_2,y_2)$，其 x 坐标为整数，以减少误差(注意不得用原始实验数据点，必须从图线上重新读取).

可用一些特殊符号(如 Δ)标定所取点 P_1、P_2，以区别原来的实验点.

由两点式求出该直线的斜率，即

$$b=\frac{y_2-y_1}{x_2-x_1}$$

注意：在物理实验的坐标系中，纵坐标和横坐标代表不同的物理量，分度值与空间坐标不同，故不能用量取直线倾角求正切值的方法求斜率.

2) 直线截距的求法

一般情况下，如果横坐标 x 的原点为零，直线延长和坐标轴交点的纵坐标 y 即为截距(即 $x=0$，$y=a$). 否则，在图线上再取一点 $P_3(x_3,y_3)$，利用点斜式求得截距为

$$a=y_3-\frac{(y_2-y_1)}{(x_2-x_1)}x_3$$

利用描点作图求斜率和截距仅是粗略的方法，严格的方法应该用线性拟合最小二乘法，后面将予以介绍.

例 1　伏安法测电阻的数据如表 1.5.1 所示，试用作图法求 R_x 的值.

表 1.5.1　伏安法测电阻的数据表

测量次数	1	2	3	4	5	6	7
电压 U/V	0.00	1.00	2.49	4.01	5.40	6.71	8.20
电流 $I\times10^{-3}$/A	0.00	0.51	1.20	1.81	2.51	3.22	3.81

解　(1) 选取比例. 用一张毫米分格的直角坐标纸，根据原始数据的有效数字位数及图线的对称性，考虑所作图线大致占据的范围和应取的比例大小. 按所给数据，若 U 和 I 均取 1∶1，则 U 共需 9cm，而 I 需 4cm，这样作出的图线是狭长的. 若 U 取 1∶1，而 I 用 2∶1，则图线既不损失有效数字，又比较匀称.

(2) 确定纵、横轴坐标名称，以整数进行标度并注明单位，然后将实验点逐点标在图纸上，如图 1.5.1 所示.

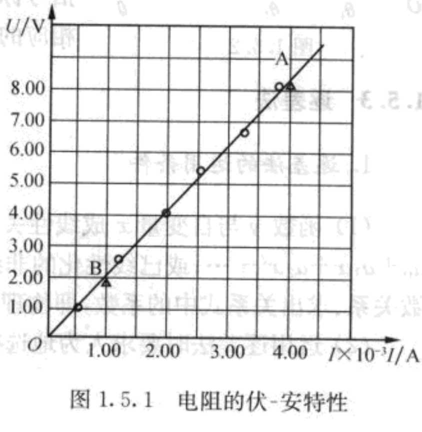


图 1.5.1　电阻的伏-安特性

(3) 通过数据点画出函数曲线，本例为直线，

应使实验数据点均匀地分布在直线两侧.

(4) 根据两点求斜率的方法求 R_x.

在直线上选取便于读数的 A、B 两点,并标出其坐标,特别注意这两点应保持合适的间距,以便使 U_A-U_B 和 I_A-I_B 都能保持原来的有效数字位数,从而使计算出的 R_x 保持应有的有效位数.

$$R_x=\frac{U_A-U_B}{I_A-I_B}=\frac{8.50-2.20}{(4.00-1.00)\times10^{-3}}=2.10\times10^3(\Omega)$$

(5) 标出图线名称:本例可称为"电阻的伏-安特性".

3. 内插(或外延)图解法

在做出实验图线后,实际上就确定了两个变量之间的函数关系. 因此,如果知道了其中一个物理量的值,就可以从图线上找出另一个物理量相应的值(未经实测的). 如果需要的值能直接在图线上找到,这就是内插法;如果需要把图线延长后才能找到需要的值,则是外延法.

内插(或外延)法的基本步骤为:

(1) 根据已经知道的物理量的值,在相应的坐标轴上找到与该值对应的点;

(2) 用虚线作通过该点且与该点所在坐标轴垂直的线段,与图线相交于一点;

(3) 用虚线作通过上述交点且与原虚线垂直的线段,与待求物理量所在的坐标轴交于一点,该点的坐标对应的值就是与前述已知物理量值所对应的另一个物理量的值.

(4) 需要外延时,可将实验所得图线向着本次实验数据范围以外区域,按原有规律延伸并用虚线画出,以区别范围内的图线.

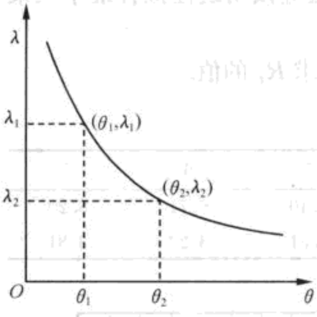


图 1.5.2

例如,已经通过实验绘制出波长 λ 和偏向角 θ 的关系图线,现在用同一装置在相同的条件下测出某条谱线的偏向角为 θ_1,要求用图解法求这条谱线的波长.

如图 1.5.2 所示,先在图上的 θ 轴上找到 θ_1 这一点,再用前面介绍的方法作两条虚线,后一条虚线与 λ 轴的交点对应的就是 λ_1 的值. 在作图时一般应将 θ_1 和 λ_1 的值用括号标注在相应的点旁. 同理由测量值 θ_2,从图上可得出相应的 λ_2.

1.5.3 逐差法

1. 逐差法的运用条件

(1) 函数 y 与自变量 x 成线性关系:$y=a_0+a_1x$;或可以写成 x 的多项式形式:$y=a_0+a_1x+a_2x^2+\cdots$;或已线性化的非线性函数等. 上述函数形式均可通过逐差法检验函数关系、求出关系式中的系数,即物理量的值.

(2) 运用逐差法时要求人为地选择自变量 x 使之作等间距变化.

2. 用逐差法处理数据的基本步骤

(1) 在测量过程中，一般可先计算因变量 y 的逐项差，用来检验线性变化的优劣，以便及时发现问题.

(2) 按自变量 x 等量增加测量偶数对 $(x_j, y_j)(j=1,2,\cdots,2n)$ 数据后，将数据对分成前后两组，然后按前后两组数据的对应序号求出 n 个差值 $y_{n+i}-y_i(i=1,2,\cdots,n)$.

(3) 求 n 个 $y_{n+i}-y_i$ 的平均值与不确定度. 必要时也可求出线性方程的斜率及截距(求截距 a 时，可将斜率 b 代入方程 $y_i=a_j+bx_j$ 得 $2n$ 个 a_j 后取平均).

例 2　用伸长法测钢丝的杨氏模量实验中，钢丝在拉力作用下，用光杠杆及望远镜尺组系统测伸长量的数据列于表 1.5.2 中，试计算受 1N 力时，在望远镜中测得的金属丝伸长量.

已知金属丝的伸长与拉力成正比，实验用每次增加 9.8N 载荷来改变金属丝的受力状态，保证了等间距变化.

表 1.5.2　伸长法测钢丝的杨氏模量测量数据

项目序号 j	载荷 $F/9.80\text{N}$	伸长量 $L/10^{-3}\text{m}$	$L(=L_{j+1}-L_j)/10^{-3}\text{m}$	$L(=L_{i+4}-L_i)/10^{-3}\text{m}$
1	0.00	0.0		
2	1.00	3.8	3.8	
3	2.00	7.9	4.1	
4	3.00	11.8	3.9	
5	4.00	15.9	4.1	15.9
6	5.00	19.8	3.9	16.0
7	6.00	24.0	4.2	16.1
8	7.00	27.7	3.7	15.9
平均值				16.0

上表中第四列 $L=L_{j+1}-L_j$ 项表示每增加 1kg(9.8N)砝码时金属丝的伸长量，其平均值为

$$\overline{L_{j+1}-L_j}=\frac{1}{7}[(L_2-L_1)+(L_3-L_2)+\cdots+(L_8-L_7)]=\frac{1}{7}(L_8-L_1)$$

由此可见，中间项的测量数据全部取消，只剩下首尾两个数据，显然用这种方法处理数据是不合理的. 比较合理的方法就是采用逐差法，因为它充分利用了所有的测量数据. 上表中第五列给出了每增加 4kg(4×9.8N)砝码时金属丝的伸长量，其平均值为

$$\overline{L_{i+4}-L_i}=\frac{1}{4}[(L_5-L_1)+(L_6-L_2)+(L_7-L_3)+(L_8-L_4)]=16.0\times10^{-3}(\text{m})$$

$$U_L=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}[(L_{i+4}-L_i)-(\overline{L_{i+4}-L_i})]}{4-1}}=0.096=0.1\times10^{-3}(\text{m})$$

可得

$$\Delta L=\frac{\overline{L_{i+4}-L_i}}{4\times 9.80}=\frac{16.0\times 10^{-3}}{4\times 9.80}=4.08\times 10^{-4}(\mathrm{m\cdot N^{-1}})$$

$$U_{\Delta L}=\frac{S_L}{4\times 9.80}=\frac{0.1\times 10^{-3}}{4\times 9.8}=0.03\times 10^{-4}(\mathrm{m\cdot N^{-1}})$$

结果完整表达式为

$$\Delta L=(4.08\pm 0.03)\times 10^{-4}(\mathrm{m\cdot N^{-1}})$$

1.5.4 线性回归法

作图法在数据处理中虽然是一种直观而便利的方法，但在图线的绘制过程中会引起附加误差，因此有时不如用函数解析形式表示出来更为明确和便利. 人们通过实验数据求出经验公式，这个过程称为回归分析. 它包括两类问题：第一类是函数关系已经确定，但式中的系数是未知的，在测量了 n 对(x_i,y_i)值后，要求确定系数的最佳估计值，以便将函数具体化；第二类问题是 y 和 x 之间的函数关系未知，需要从 n 对(x_i,y_i)测量数据中寻找出它们之间的函数关系式，即经验方程式. 我们只讨论第一类问题中的最简单的函数关系，即一元线性方程的回归(或称直线拟合).

1. 一元线性回归

线性回归是一种以最小二乘原理为基础的实验数据处理方法，下面就最小二乘原理作简单介绍.

若已知函数的形式为

$$y=b_0+b_1x \tag{1.5.1}$$

由于自变量只有 x 一个，故称为一元线性回归.

实验得到的数据，当 $x=x_1,x_2,x_3,\cdots,x_n$ 时，对应的 $y=y_1,y_2,y_3,\cdots,y_n$. 在许多实验中，x、y 两个物理量的测量总有一个物理量的测量精度比另一个高，我们把测量精度较高的物理量作为自变量 x，其误差可忽略不计，而把精度较低的物理量作为因变量 y. 显然，如果从上述测量列中任取(x_i,y_i)的两组数据就可得出一条直线，只不过这条直线的误差有可能很大. 直线拟合(线性回归)的任务就是用数学分析的方法从这些观测到的数据中求出一个误差最小的最佳经验公式 $y=b_0+b_1x$. 根据这一最佳经验公式做出的图线虽然不一定能通过每一个实验观测点，但是它以最接近这些实验点的方式平滑地穿过它们. 因此，对应于每一个 x_i 值，观测值 y_i 和最佳经验公式的 y 值之间存在一个偏差 ε_i，我们称它为观察值 y_i 的偏差，即

$$\varepsilon_i=y_i-y=y_i-b_0-b_1x \tag{1.5.2}$$

ε_i 的大小和正负表示了实验观测点在回归法求得的直线两侧的分散程度. 显然，ε_i 的值与 b_0 和 b_1 的取值有关. 为使偏差的正负和不抵消，且考虑所有实验值的影响，我们计算各偏差的平方和 $\sum\limits_{i=1}^{n}\varepsilon_i^2$ 的大小(下面略去求和号的求和范围，写成 $\sum\varepsilon_i^2$). 如果 b_0 和 b_1 的取值使 $\sum\varepsilon_i^2$ 最小，b_0 和 b_1 即为所求的值，由 b_0 和 b_1 所确定的经验式就是最佳经验式. 这种方法称为最小二乘法.

为使

$$\sum \varepsilon_i^2 = \sum (y_i - b_0 - b_1 x_i)^2$$

最小，则其对 b_0 和 b_1 的一阶偏导数应分别等于零，即

$$\frac{\partial \sum \varepsilon_i^2}{\partial b_0} = -2\sum (y_i - b_0 - b_1 x_i) = 0$$

$$\frac{\partial \sum \varepsilon_i^2}{\partial b_1} = -2\sum [(y_i - b_0 - b_1 x_i) x_i] = 0$$

令

$$\overline{x} = \frac{1}{n}\sum x_i$$

$$\overline{y} = \frac{1}{n}\sum y_i$$

$$\overline{x^2} = \frac{1}{n}\sum x_i^2$$

$$\overline{xy} = \frac{1}{n}\sum x_i y_i$$

一阶偏导方程整理得

$$b_1 \overline{x} + b_0 = \overline{y}$$
$$b_1 \overline{x^2} + b_0 \overline{x} = \overline{xy}$$

上述两方程的解为

$$b_1 = \frac{\overline{x}\,\overline{y} - \overline{xy}}{\overline{x}^2 - \overline{x^2}} \tag{1.5.3}$$

$$b_0 = \overline{y} - b_1 \overline{x} \tag{1.5.4}$$

不难证明，$\sum \varepsilon_i^2$ 对 b_0 和 b_1 的二阶偏导均大于零，故求得的 b_0 和 b_1 使 $\sum \varepsilon_i^2$ 为最小值.

将求得的 b_0 和 b_1 值代入直线方程，就可得到最佳经验公式 $y=b_0+b_1 x$.

上面介绍的用最小二乘原理求经验公式中常数 b_0 和 b_1 的方法，是一种直线拟合法，它在科学实验中应用广泛. 用这种方法计算的常数值 b_0 和 b_1 是“最佳的”，但并不是没有误差的，它们的误差估算问题比较复杂，这里就不再介绍了.

2. 能化为线性回归的非线性回归

非线性回归是一个复杂的问题，并无固定的解法，但若某些非线性函数经过适当变换后成为线性关系，仍可用线性回归方法处理.

例如，指数函数 $y=ae^{bx}$（式中 a 和 b 为常数）等式两边取对数可得

$$\ln y = \ln a + bx$$

令 $\ln y = y'$，$\ln a = b_0$，即得直线方程

$$y' = b_0 + bx$$

这样便可把指数函数的非线性回归问题转化为一元线性回归问题.

又如，对幂函数 $y=ax^b$ 来说，等式两边取对数，得

$$\ln y = \ln a + b\ln x$$

令 $\ln y = y'$，$\ln a = b_0$，$\ln x = x'$，则得直线方程

$$y' = b_0 + bx'$$

同样转化成了一元线性回归.

由此可见，任何一个非线性函数只要能设法将其转化成线性函数，就可能用线性回归方法处理.

3. 线性回归是否合理的检验

用回归法处理同一组实验数据，不同的实验者可能取不同的函数形式，从而得出不同的结果. 为了检验所得结果是否合理，在待定常数确定后，还要与相关系数 r 进行比较. 对于一元线性回归，r 定义为

$$r = \frac{\overline{xy} - \bar{x}\,\bar{y}}{\sqrt{(\overline{x^2} - \bar{x}^2)(\overline{y^2} - \bar{y}^2)}} \tag{1.5.5}$$

r 值总是在 0 与 ±1 之间. r 值越接近 1，说明实验数据点越能密集分布在求得的直线的近旁，用线性函数进行回归比较合理；相反，如果 $|r|$ 远小于 1 而接近 0，则说明实验点对所求得的直线来说很分散，用线性函数回归不合适，x 和 y 完全不相关，必须用其他函数重新试探.

例 3 测得某铜棒的长度 l 随温度 t 的变化数据见表 1.5.3，试用最小二乘法求 l-t 的经验公式，并求出 0℃时的铜棒长度 l_0 和热膨胀系数 a.

表 1.5.3 铜棒的长度 l 随温度 t 的变化数据表

t/℃	20	30	40	50	60
l/mm	1000.36	1000.53	1000.74	1000.91	1001.06

解 (1) 根据(1.5.3)式、(1.5.4)式，将各数据列表 1.5.4.

表 1.5.4 例 3 数据处理表

i	$x_i(t_i)$	$y_i(l_i)$	x_i^2	y_i^2	x_iy_i
1	20	1000.36	400	1 000 720.13	20 007.2
2	30	1000.53	900	1 001 060.28	30 015.9
3	40	1000.74	1600	1 001 480.55	40 029.6
4	50	1000.91	2500	1 001 820.83	50 045.5
5	60	1001.06	3600	1 002 121.12	60 063.6
$\sum$	200	5003.60	9000	5 007 202.91	200 161.80

由上列表格的数据可求得

$$\bar{x} = 40,\quad \bar{y} = 1000.72,\quad \overline{x^2} = 1800,\quad \overline{y^2} = 1\,001\,440.58,\quad \overline{xy} = 40\,032.36$$

(2) 由(1.5.3)式、(1.5.4)式，求 b_1 和 b_0 的值为

$$b_1 = \frac{\bar{x}\,\bar{y} - \overline{xy}}{\bar{x}^2 - \overline{x^2}} = \frac{40 \times 1000.72 - 40\,032.36}{1600 - 1800} = 0.0178$$

$$b_0 = \bar{y} - b_1\bar{x} = 1000.72 - 0.0178 \times 40 = 1000.008 = 1000.01$$

故经验公式为

$$y = 1000.01 + 0.0178x$$

(3) 根据(1.5.5)式求相关系数

$$r = \frac{\overline{xy} - \bar{x}\,\bar{y}}{\sqrt{(\overline{x^2} - \bar{x}^2)(\overline{y^2} - \bar{y}^2)}} \approx 0.9944$$

因 $r=0.9944$ 接近于1,故线性回归合理.

(4) 将经验公式与 $l=l_0+l_0 at$ 进行比较,得

$$l_0 = 1000.01(\text{mm})$$

$$al_0 = 0.0178(\text{mm} \cdot ℃^{-1})$$

$$a = 1.78 \times 10^{-5}(℃^{-1})$$

故 l-t 的经验公式为

$$l = 1000.01 \times (1 + 1.78 \times 10^{-5} t)$$

【习题】

1. 指出下列情况属于随机误差还是系统误差:

(1) 米尺刻度不均匀;

(2) 米尺因温度改变而伸缩;

(3) 千分尺零点不准;

(4) 水银温度计毛细管不均匀;

(5) 观测者读数时的习惯性偏向;

(6) 电网电压扰动对加热功率带来的影响;

(7) 加热丝电阻随温度的变化对加热功率带来的影响;

(8) 天平未调水平;

(9) 忽略空气浮力对单摆周期测量的影响;

(10) 电表接入其内阻引起的测量误差.

2. 指出下列各量是几位有效数字:

(1) $L=0.00\,001$cm　　(2) $T=1.0001$s

(3) $E=2.7\times10^{25}$J　　(4) $g=980.123\,06$cm · s^{-1}

3. 根据测量不确定度和有效数字的概念,改正以下测量结果表达式,写出正确答案.

(1) $d=(10.430\pm0.3)$cm

(2) $U=(1.915\pm0.05)$V

(3) $L=(10.85\pm0.200)$mm

(4) $P=(31\,690\pm200)$kg

(5) $R=(12\,345.6\pm4)\times10\Omega$

(6) $I=(5.354\times10^4\pm0.045\times10^3)$mA

(7) $L=(10.0\pm0.095)$mm

4. 判断下列各式的正误,请在括号内填写有效数字的正确答案.

(1) $1.732\times1.74=3.013\,68$(　　)

(2) 628.7÷7.8=80.603(　　)

(3) (38.4+4.256)÷2.0=21.328(　　)

(4) (17.34−17.13)×14.28=2.9988(　　)

5. 换算下列各测量值的单位：

(1) 4.80cm=(　　)m=(　　)mm

(2) 30.70g=(　　)kg=(　　)mg

(3) 3.50mA=(　　)A=(　　)μA

6. 用一级千分尺(允差为 0.04mm)测量一钢球直径为 7.985mm, 7.896mm, 7.984mm, 7.986mm, 7.987mm, 7.985mm, 7.985mm, 7.986mm. 求钢球的直径和不确定度，并写出测量结果的完整表达式.

7. 已知质量为 $m=(213.04\pm0.05)$g 的铜圆柱体，用 0～125mm、分度为 0.02mm 的游标卡尺测得其高度 h 为 80.38mm, 80.37mm, 80.36mm, 80.37mm, 80.36mm, 80.38mm；用一级 0～25mm 千分尺测得其直径 d 为 19.465mm, 19.466mm, 19.465mm, 19.464mm, 19.467mm, 19.466mm. 求该铜柱体的密度.

8. 金属的电阻与温度的关系为 $R=R_0(1+\alpha T)$，这里 R 表示 T℃时的电阻，R_0 表示 0℃时的电阻，α 是电阻的温度系数. 实验测得 R 和 T 的数据如题表 1.1 所示，试求：

(1) 用图解法求电阻的温度系数 α 和 0℃时的电阻 R_0.

(2) 用线性回归法求 α 和 R_0.

题表 1.1

i	1	2	3	4	5	6	7	8
T/℃	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0
R/Ω	12.3	12.9	13.6	13.8	14.5	15.1	15.2	15.9

第 2 章　力学与热学实验

实验 2.1　自由落体运动的研究

仅在重力作用下，物体由静止开始竖直下落的运动称为自由落体运动. 由于受空气阻力的影响，自然界中的落体都不是严格意义上的自由落体. 只有在高度抽真空的试管内才可观察到真正的自由落体运动——一切物体(如铁球与鸡毛)以同样的加速度运动. 这个加速度称为重力加速度.

重力加速度 g 是物理学中的一个重要参量. 地球上各个地区的重力加速度，随地球纬度和海拔高度的变化而不同. 一般说来，在赤道附近 g 的数值最小，纬度越高，越靠近南北两极，则 g 的数值越大. 在地球表面附近 g 的最大值与最小值相差仅约 1/300. 准确测定重力加速度 g，在理论、生产和科研方面都有着重要的意义. 研究 g 的分布情形对地球物理学这一领域尤为重要. 利用专门仪器，仔细测绘小地区内重力加速度的分布情况，可对地下资源进行勘查.

本实验对小球下落运动的研究，仅限于低速情形，因此，空气阻力忽略不计，可视其为自由落体运动.

【实验目的】

(1) 测定重力加速度 g.

(2) 学会用二次逐差法处理实验数据.

【实验器材】

自由落体仪、直流电源、多用毫秒计.

【仪器介绍】

自由落体仪如图 2.1.1 所示. 它由附有刻度尺的钢管、光电控制门(以下简称光控门)、直流电磁铁、三脚座、小钢球、重锤等部件组成.

钢管固定在三脚座上，调节三脚座上的螺钉. 可调节钢管的垂直度，以保证小钢球下落时能准确通过两个光控门的中心.

两个光控门可以沿钢管上下移动，两个光控门间的距离，通过读数穿孔在刻度尺上读出(两读数之差)，此读数即是小钢球在时间 t 内的下落高度 h.

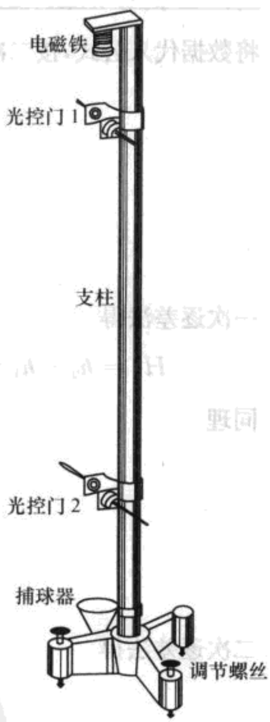


图 2.1.1

直流电磁铁固定在钢管的顶端，电源由三脚座上固定的接线柱输入. 电磁铁的工作电压为 4V. 当电源接通后，小钢球可被吸在电磁铁的磁极上. 电源一经断开，小钢球即自由下落. 在小钢球通过上光控门时，毫秒计开始计数，通过下光控门时，毫秒计停止计数，于是小钢球通过两个光控门间的时间，由毫秒计读出.

【实验原理】

自由落体运动是一种初速度为零、加速度为 g 的匀加速直线运动，即

$$h=\frac{1}{2}gt^2 \tag{2.1.1}$$

若物体下落至某一高度处所具有的速度为 v_0，那么，于该高度处 t 时间内物体下落的高度为

$$h=v_0t+\frac{1}{2}gt^2 \tag{2.1.2}$$

在实验中，我们测出一系列以 $nt(n=1,2,3,\cdots)$ 所对应的高度 $h_i(i=1,2,3)$，就可由(2.1.2)式根据二次逐差法原则导出重力加速度 g. 若测得数据如表 2.1.1.

表 2.1.1

t/时间	t	$2t$	$3t$	$4t$	$5t$	$6t$	$7t$	$8t$
h/距离	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	h_8

将数据代入公式，按二次逐差法计算过程如下：

$$h_1=v_0t+\frac{1}{2}gt^2$$

$$h_2=v_0(2t)+\frac{1}{2}g(2t)^2$$

$$\cdots\cdots$$

$$h_8=v_0(8t)+\frac{1}{2}g(8t)^2$$

一次逐差法得

$$H_1=h_5-h_1=v_0(5t)+\frac{1}{2}g(5t)^2-v_0t-\frac{1}{2}gt^2=v_0(4t)+\frac{1}{2}g(24t^2)$$

同理

$$H_2=h_6-h_2=v_0(4t)+\frac{1}{2}g(32t^2)$$

$$H_3=h_7-h_3=v_0(4t)+\frac{1}{2}g(40t^2)$$

$$H_4=h_8-h_4=v_0(4t)+\frac{1}{2}g(48t^2)$$

二次逐差法得

$$A_1=H_3-H_1=8gt^2 \tag{2.1.3}$$

$$A_2=H_4-H_2=8gt^2 \tag{2.1.4}$$

由(2.1.3)式可得

$$g_1 = \frac{A_1}{8t^2}$$

由(2.1.4)式可得

$$g_2 = \frac{A_2}{8t^2}$$

取平均值

$$g = \frac{1}{2}(g_1 + g_2) = \frac{A_1 + A_2}{16t^2} \tag{2.1.5}$$

从上述计算可以看出，在 v_0 不易测得的情况下，利用二次逐差法避开了这一具有确定值的未知量. 再者，逐差法还有充分利用测量数据和计算结果具有较小误差等优点.

【实验内容】

(1) 仪器连接. 用专用导线将自由落体仪上的上、下光控门分别与多用毫秒计的光电输入插孔相连接，用导线将直流稳压电源的输出与自由落体仪上的接线柱相连接.

(2) 仪器调整与调试.

① 自由落体仪的调整. 接通直流稳压电源的开关，电源输出调在 4V 处，将重锤线上的钢球吸在电磁铁的磁铁上. 调节三脚座上的螺钉，使重锤线通过两个光控门的中心，以保证小钢球下落时准确地通过两个光控门. 断开电磁铁电源，取下重锤和钢球，将上光控门固定于距磁极 4cm 的位置，一经固定不得变动!

② 多用毫秒计的调试. 接通毫秒计的电源，将功能选择开关置于"×0.1"一挡，光电控制开关指向 S_2，检查两个光电门的光源是否对正光敏管. 在光源对正光敏管之后，毫秒计应是不计数的. 如果此时仍计数不停，需先遮一下光控门的光，毫秒计即可停止计数. 遮一下上光控门的光，毫秒计开始计数，再遮一下下光控门的光，毫秒计停止计数，最后，将置零开关扳动置零，毫秒计显示为"0.0000".

(3) 接通电磁铁电源，将测量用的小钢球吸在磁铁上，并将毫秒计置零，准备测量.

(4) 将下光控门调到适当位量，待自由落体仪停止晃动后，断开磁铁电源. 让小钢球自由下落，并反复调节下光控门的位量，直到小钢球下落的时间为 0.0500s 为止. 当小球下落时间达到 0.0500s 时，还需重复一两次，以检验其正确性. 然后记下两光控门间的距离，此距离即是 $1t$ 所对应的高度 h_1.

(5) 重复步骤(3)和(4)，测出每增加 0.0500s 所对应的高度，即 $2t, 3t, \cdots, 8t$ 所对应的高度 $h_2, h_3, \cdots, h_8$，共测出 8 个数据，并做好各次记录，填入表格内.

(6) 将直流稳压电源的输出调回零位，关断仪器电源，整理好仪器和用具，按二次逐差的方法进行数据处理.

【注意事项】

(1) 上光控门的位置一经固定，在实验中不得变动，否则需重新测量.

(2) 每次小铁球下落前，一定要等钢管停止晃动，否则毫秒计计数不准.

【预习思考】

(1) 实验步骤(2)中规定上光电门距磁极为 4cm，如果取 10cm 或 10cm 以上，行

不行?

(2) 小钢球下落时为何一定要等钢管停止晃动?

(3) 在实验步骤(4)中,如果上下两个光电门已经靠拢,时间 t_1 仍大于 0.0500s,此时应该怎么办?

(4) 物体在流体中运动时所受的阻力有两种:即黏滞阻力和压差阻力.描述流体阻力时的一个关键参数是雷诺数 Re,($Re=\rho vd/\eta$,其中 ρ、η 是流体的密度和动力黏度,v 与 d 是运动物体的速度和线度).一般地说,当 Re<1 时,物体所受阻力主要是黏滞阻力,压差阻力可以忽略不计.这时阻力 f 与 v 成正比,而当 Re 较大时,压差阻力则成为主要的了.此时,阻力 f 与 v 不再是线性关系,而是取如下表达式

$$f = c\frac{\pi l^2}{4}\cdot\frac{\rho v^2}{2}$$

其中,c 是与雷诺数有关的系数.本实验中 $Re\approx10^3$,对于从 1m 高处下落至地面的小球速度而言,c 可取为 0.46,若小球质量 $m=1.0\times10^{-2}$kg,小球线度 $d=1.3\times10^{-2}$m,$\eta=18.1\times10^{-6}$Pa·s,$\rho_{空气}=1.3$kg·m^{-3},估算小球从 1m 高处下落至地面时,受到的空气阻力,并与重力数值比较.

【习题】

(1) 用二次逐差法计算测量结果,求出相对误差(取珞珈山地区重力加速度的标准值为 979.4cm·s^{-2}).

(2) 结合自己的实际操作情况以及实验条件,分析引起误差的主要因素.

(3) 用逐差法处理数据,应具备什么条件?

(4) 如果用体积相同而质量不同的小木球来代替小铁球,试问实验所得到的 g 值是否不同?怎样通过实验来证实?

实验 2.2 气垫导轨上的实验

气垫导轨是一种现代化的力学实验仪器.它利用小型气源将压缩空气送入导轨内腔,空气再由导轨表面上的小孔中喷出,在导轨表面与滑行器内表面之间形成很薄的气垫层.滑行器就浮在气垫层上,与轨面脱离接触,因而能在轨面上做近似无阻力的直线运动,极大地减小了在力学实验中由于摩擦力引起的误差.目前,气垫技术在很多部门得到广泛应用,是一种有着广泛发展前途的新技术.

本实验安排"速度和加速度的测量"与"弹簧振子的简谐振动"两个实习内容.

2.2.1 速度和加速度的测量

【实验目的】

(1) 学习气垫导轨的使用方法.

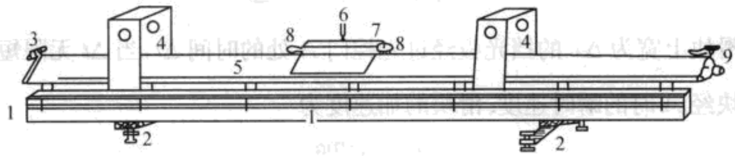
(2) 学会在气垫导轨上测量速度.

【实验器材】

气垫导轨、光电门、数字毫秒计、气源、游标卡尺.

【仪器介绍】

气垫导轨(图 2.2.1)是一种力学装置,它由导轨、滑块和光电计时装置等组成.



1. 工字钢底座;2. 底脚螺丝;3. 滑轮;4. 光电门;5. 导轨;
6. 挡光板;7. 滑块;8. 缓冲弹簧;9. 进气嘴

图 2.2.1　气垫导轨

(1) 导轨.导轨是长 1.2～1.5m 固定于工字钢上的三角形中空铝管,在管上部相邻的两个侧面上,钻有两组等距离的小孔,小孔直径为 0.4mm 左右,导轨一端装有进气嘴,当压缩空气由进气嘴送入管腔后,就从小孔喷出高速气流.在导轨上还装有缓冲弹簧和调节水平用的底脚螺丝等附件.

(2) 滑块由长约 15cm 的角形铝材制成,其内表面与导轨的两个侧面精密吻合.当导轨上小孔喷出气流时,在滑块与导轨之间便形成很薄的气层(即所谓气垫),使滑块悬浮在导轨上,故滑块能在导轨上做近于无摩擦的运动.滑块两端也装有缓冲弹簧,中部装有用来测量时间间隔的挡光板.

(3) 光电计时装置由光电门、光电控制器和毫秒计组成.在导轨的一个侧面安装位置可以移动的光电门(它由光电二极管和小聚光灯组成),它能测定滑块在气垫导轨上不同位置的速度.将光电二极管的两极通过导线和数字毫秒计的光控输入端相接,当光电门中的聚光小灯射向二级管的光被运动滑块上的挡光板遮拦时,光电控制器立即输出计时脉冲,毫秒计开始计时,待滑块通过,挡光结束,光电控制器输出一个停止计时脉冲,则毫秒计停止计时,这时毫秒计显示的数字就是开始挡光到挡光结束之间的时间间隔.若挡光板的宽度为 Δx,毫秒计所显示的时间为 Δt,则可求得滑块经过光电门时的平均速度 $v=\frac{\Delta x}{\Delta t}$,如适当地减小挡光板的宽度 Δx,以致挡光板通过光电门的时间 Δt 非常短暂,则上述平均速度就近似为瞬时速度.

【实验原理】

当气垫处于水平时,导轨上的滑块由于受气垫的漂浮作用和重力作用,静止于导轨上.如给滑块一初速度,则滑块将做匀速直线运动,此时,其路程与时间成正比,比值就是速度,即$\frac{s_1}{t_1}=\frac{s_2}{t_2}=\cdots=v$.

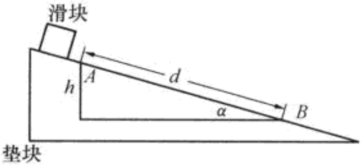


图 2.2.2

若将导轨调整为具有一倾角 α，如图 2.2.2 所示，则滑块从上往下做匀加速直线运动，在某时刻 t 到达某点 A 的瞬时速度，就是在时刻 t 附近无限短时间间隔 Δt 内平均速度的极限值，因此瞬时速度 v 和平均速度 $\bar{v}$ 分别为

$$v=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta x}{\Delta t},\quad \bar{v}=\frac{\Delta x}{\Delta t} \tag{2.2.1}$$

如果能测得滑块上宽为 Δx 的挡光板经过光控门 A 处的时间 Δt，当 Δt 无限短时，则 $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ 可近似看做滑块经 A 时的瞬时速度. 滑块的加速度为

$$a=g\sin\alpha$$

设滑块经某点 A 的速度为 v_A，经某点 B 的速度为 v_B，A、B 间路程为 d，A、B 两点间高度差为 h，则有

$$a=\frac{v_B^2-v_A^2}{2d} \tag{2.2.2}$$

$$a=g\sin\alpha=g\,\frac{h}{d} \tag{2.2.3}$$

如在 A、B 处各放一个光电门，分别测出滑块在 A、B 处的速度(用宽为 Δx 的挡光板经过光控门时的平均速度 $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ 代替瞬时速度)，即可用(2.2.2)式求得加速度，并可用(2.2.3)式验证.

【实验内容】

1. 测量速度

(1) 将导轨调整为水平状态.

(2) 调节气垫导执一端底角螺丝，使导轨倾斜一角度 α，记下 B 点 10.0cm 处和 A 点 110.0cm 处(d=100.0cm)的水平高度差 h.

(3) 计时仪置 0.1ms 挡，将一光电门置于导轨上某位置，接好导线. 在滑块上装一宽度为 5.0cm 的挡光片，让滑块从高端起点自由下滑，记录数字毫秒计的读数 Δt. 重复测量 5 次，记入表 2.2.1 中.

表 2.2.1　速度测量数据表　　　h=____ cm　　　d=____ cm

Δx/cm	Δt/s					$\overline{\Delta t}$/s	$\bar{v}$/cm · s^{-1}
5.0							
4.0							
3.0							
2.0							
1.0							

(4) 取下滑块，改变挡光片的宽度 Δx，使 Δx 依次为 4.0cm，3.0cm，2.0cm，1.0cm，

重复步骤(3)，测量 Δt，记入表中. 注意：挡光片应如何安装才正确？

(5) 以 Δt 为横坐标，Δx 为纵坐标，在直角坐标纸上作 v-Δt 图. 并由图上外推求出 $\Delta t\to 0$ 时的数值 v，v 即为滑块经过此点的瞬时速度.

2. 测量加速度

(1) 在滑块上安装 Δx 为 2.0cm 的挡光片，将光电门首先置于导轨上距端点 25cm 处(即 $s=25$cm)，让滑块从高端起点自由下滑，记下滑块经过光电门的时间 Δt，重复 3 次取平均值. 数据记录在表 2.2.2 中.

表 2.2.2　加速度测量数据表

s/cm		25.0	50.0	75.0	100.0	125.0		
Δt/s	1							
	2							
	3							
	Δt 平均							
$v/\mathrm{cm\cdot s^{-1}}$								
$a/\mathrm{cm\cdot s^{-2}}$								

(2) 改变光电门的位置，使之依次等距离增加(如 $s=50.0$cm，75.0cm，100.0cm 和 125.0cm 等)，重复步骤(1)，算出各相应位置的速度.

(3) 求加速度. 可用任意两速度和其通过的距离由(2.2.2)式计算求出 a，最后取平均值. 在求平均值之前，首先去掉误差较大的，或重做.

(4) 量出导轨两端底脚螺丝间的距离 L，量出导轨由水平调高一端的高度 H. 由于(2.2.3)式中 A、B 两点水平高差 h 不易测量准确，故以测 H 代替之. 在角度较小时，$\sin\alpha\approx\tan\alpha=\dfrac{H}{L}$，所以 $a=g\dfrac{H}{L}$，由此式计算加速度 a 的理论值，比较步骤(3)得到的结果，算出 a 的误差.

【预习思考】

(1) 滑块挡光片应怎样安装才能使测量结果最准确？路程应如何测量才正确？

(2) 除用平均速度 $\dfrac{\Delta s}{\Delta t}$ 通过作图法外推求瞬时速度外，还有别的方法吗？试简述之.

【习题】

(1) 如气垫导轨未调水平，会给加速度的测量带来什么影响？是正误差还是负误差，是随机误差还是系统误差？

(2) 用所测得的 h、d 或者 H、L 计算加速度 a 的理论值(作为约定真值)，计算实验测得的加速度的相对误差.

(3) 在导轨水平的情况下，在一端装一个滑轮，用细线连接滑块 m_1 与砝码盘 m_2，由方程式 $m_2g-T=m_2a$ 和 $T=m_1a$ 设计一个实验，外力一定，检验物体质量与物体运动加速度的关系. 滑块用铝制或铁制，简述实验步骤.

2.2.2 弹簧振子的简谐振动

【实验目的】

(1) 测量弹簧振子的振动周期 T.

(2) 求弹簧的倔强系数 k 和有效质量 m_0.

【实验器材】

气垫导轨、滑块、附加砝码、弹簧、光电门、数字毫秒计.

【仪器介绍】

实验装置如图 2.2.3 所示，在两个相同的弹簧中间系一滑块，滑块可以在水平气垫导轨上做往返运动，利用一个光电门配合计时仪器测量滑块的振动周期. 把专用连接线的一端接在光电门上，另一端（即插头）插到计时仪面板上的"光电"插座，此"光电"插座上的开关扳向"输入"一边，另一"光电"插座上的开关扳向"短接"一边；"光电-电位"开关扳向"光电". 毫秒计的信号选择指示数 n 表示第一次遮光时开始计时，第 n 次遮光时停止计时. 实验中根据实验条件，合理选择.

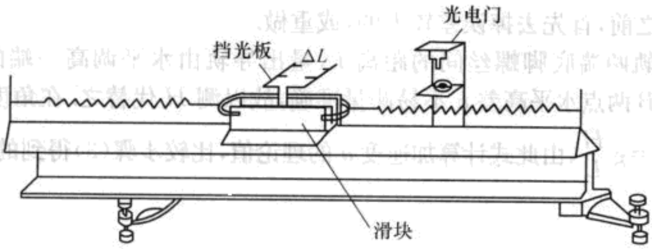


图 2.2.3

在滑块上加砝码块，可以改变滑块的质量. 每次加减砝码应同时使用两块，在挡光板两侧对称地增减，使滑块的整个质量均匀地分布在气垫导轨上.

砝码块上标有号码，可以在天平上称出它的质量.

【实验原理】

在水平的气垫导轨上，两个相同的弹篱中间系一滑决，滑块做往返振动，如图 2.2.4 所示. 如果不考虑滑决运动的阻力，那么，滑块的振动可以看成是简谐振动.

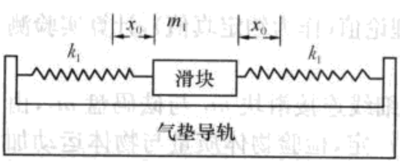


图 2.2.4

设质量为 m_1 的滑块处于平衡位置，每个弹簧的伸长量为 x_0，当 m_1 距平衡点 x 时，m_1 只受弹性力 $-k_1(x+x_0)$ 与 $-k_1(x-x_0)$ 的作用，其中 k_1 是

弹簧的倔强系数. 根据牛顿第二定律,其运动方程为

$$-k_1(x+x_0)-k_1(x-x_0)=m\ddot{x}$$

令

$$k=2k_1$$

则有

$$-kx=m\ddot{x} \tag{2.2.4}$$

方程(2.2.4)的解为

$$x=A\sin(\omega_0 t+\varphi_0) \tag{2.2.5}$$

说明滑块做简谐振动. 式中,A 为振幅,φ_0 为初相位,ω_0 叫做振动系统的固有圆频率. 有

$$\omega_0=\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{2.2.6}$$

且

$$m=m_1+m_0 \tag{2.2.7}$$

式中,m 为振动系统的有效质量,m_0 为弹簧有效质量,m_1 为滑块和砝码的质量.

ω_0 由振动系统本身的性质所决定. 振动周期 T 与 ω_0 有下列关系

$$T=\frac{2\pi}{\omega_0}=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}=2\pi\sqrt{\frac{m_1+m_0}{k}} \tag{2.2.8}$$

在实验中,我们改变 m_1,测出相应的 T,考虑 T 与 m 的关系,从而求出 $\bar{k}$ 和 $\bar{m}_0$

【实验内容】

(1) 按气垫导轨和计时器的使用方法和要求,将仪器调整到正常工作状态.

(2) 将滑块从平衡位置拉至光电门左边某一位置,然后放手让滑块振动,记录 T_A 的值. 要求记录5位有效数字,共测量10次.

(3) 再按步骤(2)将滑块从平衡位置拉至光电门右边某一位置测量 T_B,重复步骤(2)共测量10次.

取 T_A 和 T_B 的平均值作为振动周期 T,与 T 相应的振动系统有效质量是 $m=m_1+m_0$,其中 m_1 就是滑块本身(未加砝码块)的质量,m_0 为弹簧的有效质量.

(4) 在滑块上对称地加两块砝码,再按步骤(2)和步骤(3)测量相应的周期 T. 有效质量 $m=m_2+m_0$,其中 m_2 为滑块本身质量加上两块砝码的质量和.

(5) 再用 $m=m_3+m_0$ 和 $m=m_4+m_0$ 测量相应的周期 T. 式中,

$m_3=m_1+$"4 块砝码的质量"

$m_4=m_1+$"6 块砝码的质量"

注意记录每次所加砝码的号码,以便称出各自的质量.

(6) 测量完毕,先取下滑块、弹簧等,再关闭气源,切断电源,整理好仪器.

(7) 在天平上称出两弹簧的实际质量并与其有效质量进行比较.

【数据处理】

1. 用逐差法处理数据

由下列公式

$$T_1^2 = \frac{4\pi^2}{k}(m_1 + m_0)$$

$$T_2^2 = \frac{4\pi^2}{k}(m_2 + m_0)$$

$$T_3^2 = \frac{4\pi^2}{k}(m_3 + m_0)$$

$$T_4^2 = \frac{4\pi^2}{k}(m_4 + m_0) \tag{2.2.9}$$

$$T_3^2 - T_1^2 = \frac{4\pi^2}{k}(m_3 - m_1),\quad k' = \frac{4\pi^2(m_3 - m_1)}{T_3^2 - T_1^2}$$

$$T_4^2 - T_2^2 = \frac{4\pi^2}{k}(m_4 - m_2),\quad k'' = \frac{4\pi^2(m_4 - m_2)}{T_4^2 - T_2^2} \tag{2.2.10}$$

故

$$\bar{k} = \frac{1}{2}(k' + k'') \tag{2.2.11}$$

如果由(2.2.10)式得到 k' 和 k'' 的数值是一样的(即两者之差不超过测量误差的范围),说明(2.2.8)式中 T 与 m 的关系是成立的. 将平均值 $\bar{k}$ 代入(2.2.9)式,得

$$m_{0i} = \frac{\bar{k}T_i^2}{4\pi^2} - m_i \quad (i = 1,2,3,4) \tag{2.2.12}$$

$$\overline{m}_0 = \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{4} m_{0i} \tag{2.2.13}$$

平均值 $\overline{m}_0$ 就是弹簧的有效质量.

2. 用作图法处理数据

以 T_i^2 为纵坐标,m_i 为横坐标,作 T_i^2-m_i 图,得直线. 其斜率为$\frac{4\pi^2}{k}$,截距为$\frac{4\pi^2}{k}m_0$,由此可以求出 k 和 m_0.

【预习思考】

(1) 如果实验中分别采用两次和三次遮光来测量振动周期,对二者的振幅分别有什么要求?

(2) 仔细观察,可以发现滑块的振幅是不断减小的,那么为什么还可以认为滑块是做简谐振动?实验中应如何保证滑块做简谐振动?

【习题】

(1) 整理实验数据,用逐差法求弹簧的倔强系数 $\bar{k}$ 和有效质量 $\overline{m}_0$.

(2) 弹簧的实际质量与有效质量相比,哪一个大?求出两者之比.

(3) 用作图法处理实验数据,并计算出弹簧的倔强系数 $\bar{k}$ 和有效质量 $\overline{m}_0$.

(4) 将二滑决用一小弹簧联结起来(图 2.2.5)使之振动,滑块是否作简谐振动,周期和滑块质量及倔强系数有何关系?

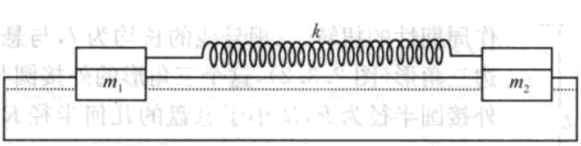


图 2.2.5

实验 2.3　用三线摆测物体的转动惯量

转动惯量是物体转动时惯性大小的量度. 它与物体的质量、质量分布、几何形状和转轴的位置有关. 对于形状复杂或不规则的物体，很难用数学的方法计算出它的转动惯量，必须用实验方法来测定. 本实验介绍测定物体转动惯量的一种方法.

【实验目的】

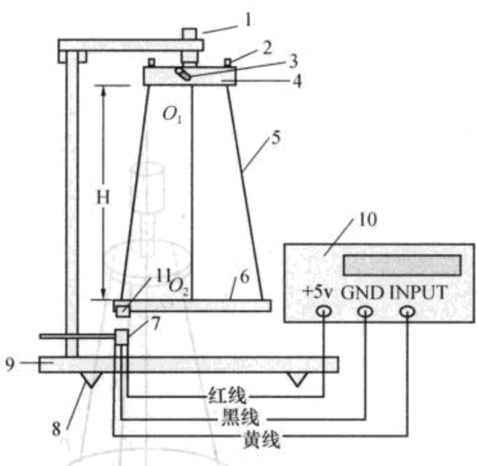
(1) 学会用三线摆测物体的转动惯量.

(2) 验证转动惯量的平行轴定理.

【实验器材】

三线摆，米尺，游标卡尺，天平，数字毫秒计，待测物(圆盘，外形尺寸及质量相同的圆柱体两个).

三线摆仪的结构如图 2.3.1 所示. 它的附件还有待测圆环、待测圆柱、水准仪等. 三线摆摆动的周期用计时计数毫秒仪来测量. 三线摆是由上、下两个匀质圆盘，用三条等长的摆线(摆线为不易拉伸的细线)连接而成. 上、下圆盘的系线点构成等边三角形，下盘处于悬挂状态，并可绕 O_1O_2 轴线作扭转摆动，称为摆盘. 由于三线摆的摆动周期与摆盘的转动惯量有一定关系，所以把待测样品放在摆盘上后，三线摆系统的摆动周期就要相应的随之改变. 这样，根据摆动周期、摆动质量及有关的参量，就能求出摆盘系统的转动惯量.



1. 起动盘锁紧螺母；2. 摆线调节锁紧螺栓；3. 摆线调节旋扭；4. 启动盘；5. 摆线；6. 悬盘；7. 霍尔开关传感器；8. 调节脚；9. 底板；10. 计时计数毫秒仪；11. 磁钢

图 2.3.1　三线摆仪

【实验原理】

1. 测悬盘绕中心轴转动时的转动惯量 I_0

三线摆实验装置如图 2.3.1 所示. 当轻轻转动水平放置的半径为 r_0 的上圆盘时，由于对称放置的三根悬线的张力作用，下悬盘即以上下盘的中心连线 O_1O_2 为轴(中心轴)

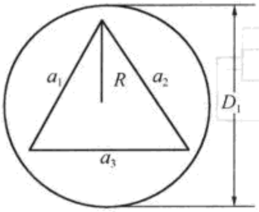


图 2.3.2

作周期性的扭转. 三根悬线的长均为 l,与悬盘的三个接点成等边三角形(图 2.3.2),这个三角形的外接圆与盘有共同的圆心,外接圆半径为 R,R 小于悬盘的几何半径 R_0. 若悬线接点之间的距离为 a,由几何关系知 $R=\sqrt{3}a/3$.

设下圆盘 P 的质量为 m_0,当它绕 O_1O_2 作小角度扭动 θ 时,圆盘的位置升高 h,它的势能增加为 E_p,则

$$E_p = m_0 gh \tag{2.3.1}$$

式中,g 为重力加速度. 这时圆盘的角速度为$\frac{d\theta}{dt}$,它具有的动能为

$$E_k = \frac{1}{2} I_0 \left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 \tag{2.3.2}$$

I_0 为圆盘对 O_1O_2 轴的转动惯量,如果略去摩擦力,根据机械能守恒定律,圆盘的势能与动能之和应等于一常量,即

$$\frac{1}{2} I_0 \left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 + m_0 gh = \text{常量} \tag{2.3.3}$$

设悬线长为 l,上圆盘悬线距圆心为 r,下圆盘悬线距圆心为 R. 当下圆盘转一角度 θ 时,从上圆盘 B 点作下圆盘垂线,与升高 h 前、后的下圆盘分别交于 C 和 C'(图 2.3.3).

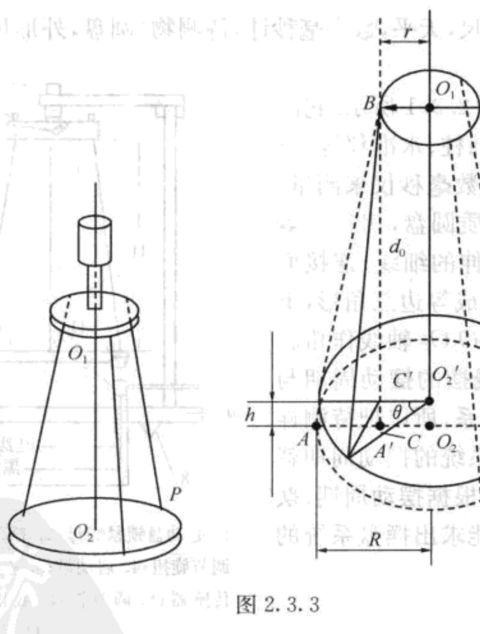


图 2.3.3

则

$$h = BC - BC' = \frac{BC^2 - BC'^2}{BC + BC'} \tag{2.3.4}$$

因为

$$BC^2 = AB^2 - AC^2 = l^2 - (R-r)^2$$

$$BC'^2 = A'B^2 - A'C'^2 = l^2 - (R^2 + r^2 - 2Rr\cos\theta)$$

所以

$$h = \frac{2Rr(1-\cos\theta)}{BC+BC'} = \frac{4Rr\sin^2\dfrac{\theta}{2}}{BC+BC'} \tag{2.3.5}$$

在扭转角较小时，$\sin\dfrac{\theta}{2}$近似等于$\dfrac{\theta}{2}$，而$(BC+BC')$可近似为两盘间距离H的二倍，则

$$h = \frac{Rr\theta^2}{2H} \tag{2.3.6}$$

将(2.3.6)式代入(2.3.3)式，并对t微分，可得

$$I_0\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2} + m_0 g\frac{Rr}{H}\theta\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = 0$$

即

$$\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2} = -\frac{m_0 gRr}{I_0 H}\theta \tag{2.3.7}$$

这是一简谐振动方程，该振动的角频率ω的平方等于

$$\omega^2 = \frac{m_0 gRr}{I_0 H}$$

而振动周期T_0等于$\dfrac{2\pi}{\omega}$，所以

$$T_0^2 = \frac{4\pi^2 I_0 H}{m_0 gRr} \tag{2.3.8}$$

由此得出

$$I_0 = \frac{m_0 gRr}{4\pi^2 H}T_0^2 \tag{2.3.9}$$

实验时，测出m_0、R、r、H及T_0，就可从上式求出圆盘的转动惯量I_0.

2. 测圆环绕中心轴转动的转动惯量I_1

把质量为m_1的圆环放在悬盘上，使两者圆心重合，组成一个系统. 测得它们绕O_1O_2轴扭动的周期为T_1，根据与(2.3.9)式相同的推导过程得这个系统的转动惯量

$$I = \frac{(m_0+m_1)gRr}{4\pi^2 H}T_1^2 \tag{2.3.10}$$

圆环绕O_1O_2轴的转动惯量

$$I_1 = I - I_0 \tag{2.3.11}$$

3. 验证平行轴定理

设某刚体的质心通过轴线O_1O_2，刚体绕这个轴线的转动惯量为I_C，如果将此刚体与其质心在转动平面内平移距离d，移后刚体对O_1O_2轴的转动惯量

$$I'_C = I_C + Md^2 \tag{2.3.12}$$

式中，M为刚体的质量，d为相对刚体来讲平移前后两平行的转轴之间的距离，这个关系

称为转动惯量的**平行轴定理**.

取下圆环,将两个质量都为 m_2 的形状完全相同的圆柱体对称地放置在悬盘上,圆柱体中心离 O_1O_2 轴线的距离为 x. 测出两柱体与悬盘这个系统绕 O_1O_2 轴扭动周期 T_2. 则两柱体此时的转动惯量为

$$2I_2=\frac{(m_0+2m_2)gRr}{4\pi^2 H}T_2^2-I_0 \tag{2.3.13}$$

将(2.3.13)式所得的结果与(2.3.12)式计算出的理论值比较,即可验证平行轴定理.

【实验内容】

1. 测悬盘对中心轴的转动惯量 I_0

(1) 将水准仪放在三线摆的支架顶端,调节底座螺钉使上支架和上圆盘水平. 再将水准仪放在悬盘中心,调整悬线轴和悬线固定螺钉,使 3 根悬线长度都为 l 且比悬盘半径大很多,这时悬盘面应水平. 待悬盘静止时,轻轻扭动上圆盘,在最大转角不超过 5°的条件下,使悬盘扭动. 悬盘扭动时,其质心只能上下移动,如果质心有左右摆动就必须重新启动扭摆.

(2) 用周期测定仪或计时计数毫秒仪测出 20 次全振动所需的时间,填入表 2.3.1,重复 3 次,计算出 $\overline{T}_0$.

(3) 用游标卡尺测出上圆盘的直径 $2r$,用米尺测出悬盘上悬线接点之间的距离 a 和上下盘之间的距离 H,填入表 2.3.2. 悬盘质量 m_0 由实验室给出,g 取理论值,计算悬盘转动惯量的实验值 I_0.

(4) 用米尺测量悬盘的几何直径 $2R_0$,根据 $I_0'=\frac{1}{2}m_0R_0^2$ 计算悬盘转动惯量的理论值,以理论值 I_0' 为真值,估算实验的误差和相对误差.

2. 测定圆环对中心轴的转动惯量 I_1

(1) 由实验室给出圆环的质量 m_1,用米尺测出圆环的内外几何直径 $2R_i$ 和 $2R_e$. 将圆环放到悬盘上,并使二者的圆心重合.

(2) 用周期测定仪或计时计数毫秒仪测出悬盘和圆环这个系统 20 次全振动所需的时间,重复 3 次,计算出 $\overline{T}_1$.

(3) 由(2.3.11)式计算圆环转动惯量的实验值 I_1,根据 $I_1'=\frac{m_1}{2}(R_i^2+R_e^2)$ 计算圆环转动惯量的理论值,以理论值 I_1' 为真值,估算误差和相对误差.

3. 验证平行轴定理

(1) 将两个圆柱体(三线摆的附件)对称地放在悬盘上,两圆柱体中心的连线经过悬盘的圆心. 用游标卡尺测出两圆柱体中心距离 $2x$. 这两个圆柱体是完全相同的,均匀分布的质量都为 m_2,直径都为 $2R_x$(用游标卡尺测出).

(2) 用周期测定仪或计时计数毫秒仪测出悬盘和和两个圆柱体这个系统 20 次全振

动所需的时间，重复 3 次，计算出$\overline{T}_1$.

(3) 由(2.3.13)式计算每个圆柱体此时转动惯量的实验值 I_2. 由平行轴定理(2.3.12)式计算此时圆柱体的理论值

$$I_2' = m_2 x^2 + \frac{1}{2} m_2 R_x^2 \tag{2.3.14}$$

以理论值 I_2'为约定真值，估算测量的误差和相对误差.

【数据处理】

表 2.3.1　用周期测定仪或计时计数毫秒仪测得的数据　（单位：s）

	悬　盘		悬盘加圆环		悬盘加两圆柱体	
全振动 20 次所需时间	1		1		1	
	2		2		2	
	3		3		3	
	平均		平均		平均	
周期	T_0		T_1		T_2	

表 2.3.2　用游标卡尺和米尺测得的数据　（单位：cm）

项目 / 次数	上圆盘直径 $2r$	悬线接线点间距离 a	圆环(米尺) 外直径 $2R_i$	圆环(米尺) 内直径 $2R_e$	圆柱体直径 $2R_x$	两圆柱体之间的距离 $2x$
1						
2						
3						
平均	$\bar{r}=$	$\bar{a}=$	$\bar{R}_i=$	$\bar{R}_e=$	$\bar{R}_x=$	$\bar{x}=$

上下两圆盘垂直距离 $H=$_______ m　悬盘 $m_0=$_______ kg　悬盘 $R_0=$_______ m　圆环 $m_1=$_______ kg
圆柱体质量 $m_2=$_______ kg

【预习思考】

(1) 如何调试三线摆上、下圆盘水平.

(2) 如何利用三线摆测定任意形状的物体绕特定轴转动时的转动惯量？

(3) 如果悬盘不在水平面内，三线摆启动后会发生什么现象？对周期的测量有何影响？

(4) 加上待测物体后三线摆的扭动周期是否一定比空盘的扭动周期大？为什么？

【习题】

(1) 将一半径小于下圆盘半径的圆盘，放在下圆盘上，并使中心一致，试讨论此时三线摆的周期和空载时的周期相比是增大、减小还是不确定？说明理由.

(2) 能否设计一测量方案，测量一个具有轴对称的不规则形状的物体，对对称轴的转动惯量？

实验 2.4 音叉的受迫振动

在机械制造和建筑工程等科技领域中受迫振动所导致的共振现象引起工程技术人员极大注意，它们既有破坏作用，但也有许多实用价值. 众多电声器件就是运用共振原理设计制作的. 此外，在微观科学研究中"共振"也是一种重要研究手段. 例如，利用核磁共振和顺磁共振研究物质结构等.

表征受迫振动性质是受迫振动的振幅-频率特性和相位-频率特性（幅频和相频特性）. 本实验研究音叉在周期外力作用下振幅与强迫圆频率之间的关系.

【实验目的】

（1）研究振动系统在周期外力作用下振幅与强迫圆频率之间的关系.

（2）测绘振动系统的共振曲线.

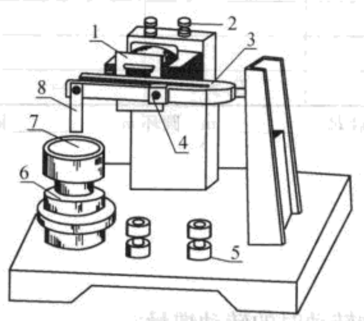
（3）应用李萨如图形测量音叉振动频率.

【实验器材】

电磁激振系统、示波器、低频信号发生器、毫伏表.

【仪器介绍】

电磁激振系统如图 2.4.1 所示，它由电磁激振线圈、音叉、压电换能片、阻力片和阻尼油杯及升降台组成.



1. 电磁激励线圈；2. 激励线圈电压输入接线柱；3. 音叉；4. 压电换能片；5. 压电换能片转换信号输出接线柱；6. 升降台；7. 阻尼油杯；8. 阻尼片

图 2.4.1

电磁激振线圈在正弦交变电流的作用下产生交变磁场激振音叉，线圈中交变磁场随正弦电流的频率而变化，电流频率越高，磁场交变越快，反之则慢. 正弦交变电流由低频信号发生器供给.

音叉是我们要研究的主要对象，它在激振线圈所产生的磁场作用下磁化而被吸引，形成被迫的振动. 当线圈中电流最大时磁场最强，吸引力最大，电流为零时磁场消失，吸引力为零，音叉被释放. 无论线圈中电流的方向如何，正弦电流变化一个周期就有两个强磁场出现，音叉也就被吸引两次，形成两次振动，即音叉的振动频率是正弦电流频率的两倍. 如果将音叉的机械振动能转换为电信号并送到示波器的 Y 轴输入端，同时将正弦电流信号送到示波器 X 轴输入端，经过适当调整则可在示波器的荧光屏上看到"∞"形图像.

压电换能片被固定在音叉的一股上，它可将音叉的机械振动转换成电信号，电信号的大小随音叉振动的强弱而变化，音叉的振幅越大，转换的信号也越大，反之则小. 转换信号大小由毫伏表指示.

【实验原理】

振动系统受 $F=H\cos pt$ 外力的持续作用所产生的振动，称为受迫振动. F 为强迫力，H 为强迫力的最大值，p 是强迫力的圆频率.

振动系统的受迫振动，开始时有一个比较复杂的过程，但经过一段时间后即达到稳定的振动状态，它的振动频率就是强迫力的频率，与系统的固有频率 ω_0 无关. 它的振幅不仅与强迫力的振幅有关，而且还与强迫力的圆频率 p、系统的固有频率 ω_0、阻尼系数 β 密切相关.

由振动原理可知，稳定状态的受迫振动表达式为

$$x=A\cos(pt+\varphi) \tag{2.4.1}$$

式中，A 为受迫振动的振幅，它和强迫力的圆频率 p、系统的固有频率 ω_0、阻尼系数 β 有如下关系：

$$A=\frac{h}{\sqrt{(\omega_0^2-p^2)+4\beta^2p^2}} \tag{2.4.2}$$

式中，$h=\dfrac{H}{m}$.

相位差 φ 与阻尼系数 β、系统的固有频率 ω_0 有如下关系：

$$\varphi=\arctan\frac{2\beta\omega}{\omega_0^2-\omega^2}=\arctan\frac{\beta T_0^2 T}{\pi(T^2-T_0^2)} \tag{2.4.3}$$

由(2.4.2)式可知，振幅 A 与强迫力的圆频率 p 有关. p 值与 ω_0 相比，当 p 值较大或较小时，A 值较小；当 $p=\sqrt{\omega_0^2-2\beta^2}$ 时，A 有一极大值，即当强迫力的圆频率 p 趋近于振动系统的固有圆频率 ω_0 时，受迫振动的振幅急剧增大，并有一极大值，这种现象称为共振. 共振时圆领率为 ω_r，相位差为 φ_r，当阻尼系数 β 极小时，可得 $\omega_r\approx\omega_0$，$\varphi_r=\dfrac{\pi}{2}$.

由上述原理可知，在实验中每改变一次 β 值、给出一系列 p 值，都可测得一组相应的 A 值，从而根据 A、p 之值绘制出不同阻尼情况下的共振曲线.

利用李萨如图形测未知频率：把两个不同频率的正弦电压分别从示波器的 X 轴和 Y 轴输入，如果这两个电压的频率为整数比，示波器上就会得到稳定的图形，这些图形称为李萨如图形，李萨如图形的形状不仅与这两个正弦电压的频率比值有关，而且与它们的初始相位和相位差有关. 图 2.4.2 为 X 轴输入电压 $x=A\cos(pt)$，Y 轴输入电压为 $x=A\cos(2pt+\varphi)$，相位差 φ 分别为 0、$\dfrac{\pi}{4}$、$\dfrac{\pi}{2}$、$\dfrac{3\pi}{4}$、π 时所对应的图形.

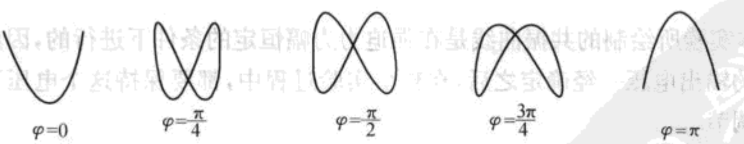


图 2.4.2

【实验内容】

(1) 仪器连接. 用屏蔽导线将低频信号发生器的输出端与激振线圈的电压输入端、示

波器"X轴输入"端连接，用屏蔽导线将压电换能片的信号输出端与示波器的"Y轴输入"端、毫伏表的电压输入端连接. 使用屏蔽导线时，芯线接正，屏蔽层接地.

(2) 示波器、低频信号发生器的使用见仪器说明书.

(3) 逆时针旋转升降台的手轮，降低阻尼油杯，使阻尼片退出油面并擦净片上的余油.

(4) 接通仪器电源，使仪器预热15min左右，并置好各仪器的旋钮.

为了保护毫伏表，该量程开关先置于"3V"挡. 实验中根据实际需要及时改变量程，既确保毫伏表指针不超过量程，又不使指针指示太小而引起读数较大误差.

(5) 测定共振频率ω_r和振幅A_r. 将低频信号发生器的频率由低到高缓慢地调节(参考值为250Hz左右)，同时仔细观察毫伏表的指针，当毫伏表指示最大时，示波器上显示出稳定的"∞"图像. 为了便于读取准确的频率读数，应仔细调节"频率微调"，使示波器上显示"∞"图像，且毫伏表指示达到最大.

A_r就是共振频率对应的毫伏表最大的指示数，待稳定后记下ω_r和A_r.

(6) 测共振频率ω_r两边的数据. 调节低频信号发生器的"频率微调"，由0～±1.5%，每隔一小格(0.25%)记录相应的振幅A，一共测出12对数据填入表2.4.1中.

表 2.4.1　　$\omega_r=$____ $A_r=$____ $\beta_0=$____

刻　度	−0.25%	−0.5%	−0.75%	−1.0%	−1.25%	−1.5%
p						
A_r						
刻　度	+0.25%	+0.5%	+0.75%	+1.0%	+1.25%	+1.5%
p						
A_r						

(7) 顺时针旋转升降台的手轮，升高阻尼油杯，使油面升到阻尼片上的第一条横线，此时的阻尼系数用β_1表示，重复步骤(5)、(6)，测出13对数据填入表中.

(8) 使油面升到阻尼片上的第二条横线，此时阻尼系数取为β_2，重复步骤(5)、(6)，测出13对数据填入表中.

(9) 根据测得的三组数据，用坐标纸在同一坐标绘制出三条共振曲线.

【注意事项】

(1) 本实验所绘制的共振曲线是在强迫力力幅恒定的条件下进行的，因此，当低频信号发生器的输出电压一经确定之后，在整个实验过程中，都要保持这个电压不变，而且要及时核对调节.

(2) 本实验使用了较多的电子仪器，而重点研究的是力学问题，因此不要过多地去研究电子仪器，以免花费不必要的时间.

(3) 绘制共振曲线时，坐标比例要选取适当.

(4) 注意信号源的输出不要短路，以防止烧坏仪器.

【预习思考】

(1) 在实验过程中,音叉的振动频率总是正弦电流频率的两倍,为什么只在共振时,示波器上的图形才显示为"∞"图像?

(2) 在实验中每改变一次低频信号发生器的输出频率,都要核对调节什么?

(3) 振动系统的振动频率为何是低频信号发生器输出频率的两倍?

(4) 在实验中每改变一次强迫力频率 p,能否立即读取数据?

【习题】

(1) 从实验所绘制的共振曲线来看,在外力振幅不变的情况下,欲降低振动系统的共振幅度应采取什么措施?有何实际价值?试叙述之.

(2) 举例说明共振现象在实际生活中的应用.

实验 2.5 玻尔共振实验

本实验中采用玻尔共振仪定量测定机械受迫振动的幅频特性和相频特性,并利用频闪方法来测定动态的物理量——相位差.

【实验目的】

(1) 研究玻尔共振仪中弹性摆轮受迫振动的幅频特性和相频特性.

(2) 研究不同阻尼力矩对受迫振动的影响,观察共振现象.

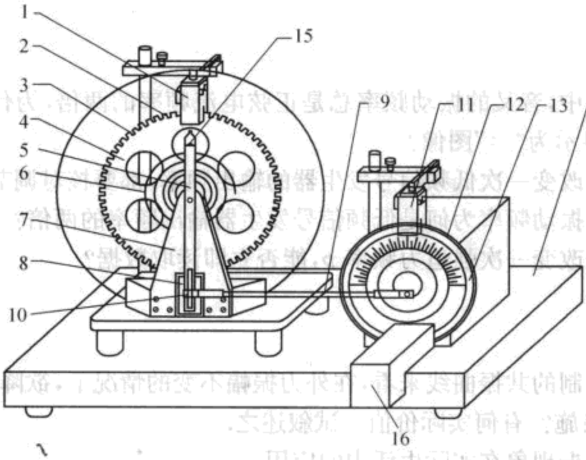
(3) 学习用频闪法测定相位差.

(4) 学习系统误差的修正.

【实验器材】

玻尔共振仪由振动仪与电器控制箱两部分组成. 振动仪部分如图 2.5.1 所示,铜质圆形摆轮 A 安装在机架上,弹簧 B 的一端与摆轮 A 的轴相连,另一端可固定在机架支柱上,在弹簧弹性力的作用下,摆轮可绕轴自由往复摆动. 在摆轮的外围有一卷槽型缺口,其中一个长形凹槽 C 比其他凹槽长出许多. 机架上对准长型缺口处有一个光电门 H,它与电器控制箱相联接,来测量摆轮的振幅角度值和摆轮的振动周期.

在机架下方有一对带有铁芯的线圈 K,摆轮 A 嵌在铁芯的空隙,当线圈中通过直流电流后,摆轮受到一个电磁阻尼力的作用. 改变电流的大小即可使阻尼力大小相应变化. 为使摆轮 A 做受迫振动,在电动机轴上装有偏心轮,通过连杆机构 E 带动摆轮,在电动机轴上装有带刻线的有机玻璃转盘 F,它随电机一起转动. 由它可以从角度读数盘 G 读出相位差 φ. 调节控制箱上的十圈电机转速调节旋钮,可以精确改变加于电机上的电压,使电机的转速在实验范围($30\sim45\mathrm{r\cdot min^{-1}}$)内连续可调,由于电路中采用特殊稳速装置、电动机采用惯性很小的带有测速发电机的特种电机,所以转速极为稳定. 电机的有机玻璃转盘



1. 光电门 H;2. 长凹槽 C;3. 短凹槽 D;4. 铜质摆轮 A;5. 摇杆 M;6. 蜗卷弹簧 B;
7. 支承架;8. 阻尼线圈 K;9. 连杆 E;10. 摇杆调节螺丝;11. 光电门 I;12. 角度盘 G;
13. 有机玻璃转盘 F;14. 底座;15. 弹簧夹持螺钉 L;16. 闪光灯

图 2.5.1 玻尔共振仪

F 上装有两个挡光片. 在角度读数盘 G 中央上方 90°处也有光电门 I(强迫力矩信号),并与控制箱相连,以测量强迫力矩的周期.

受迫振动时摆轮与外力矩的相位差是利用小型闪光灯来测量的. 闪光灯受摆轮信号光电门控制,每当摆轮上长型凹槽 C 通过平衡位置时,光电门 H 接受光,引起闪光,这一现象称为频闪现象. 在稳定情况时,由闪光灯照射下可以看到有机玻璃指针 F 好像一直"停在"某一刻度处,所以此数值可方便地直接读出,误差不大于 2°. 闪光灯放置位置如图 2.5.1 所示搁置在底座上,切勿拿在手中直接照射刻度盘.

摆轮振幅是利用光电门 H 测出摆轮读数 A 处圈上凹型缺口个数,并在控制箱液晶显示器上直接显示出此值,精度为 1°.

玻尔共振仪电器控制箱的前面板和后面板分别如图 2.5.2 和图 2.5.3 所示.

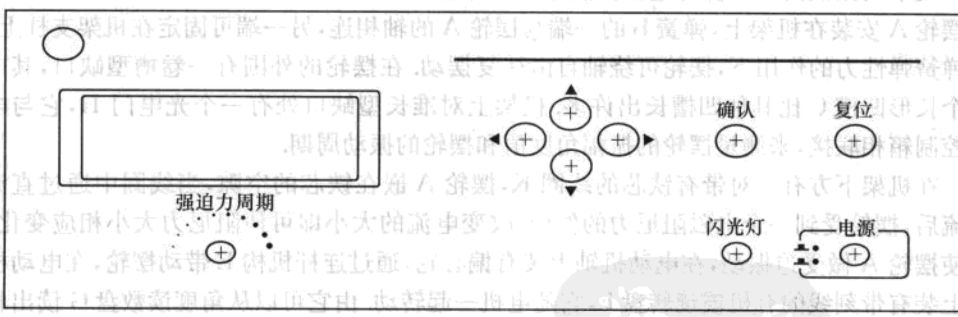
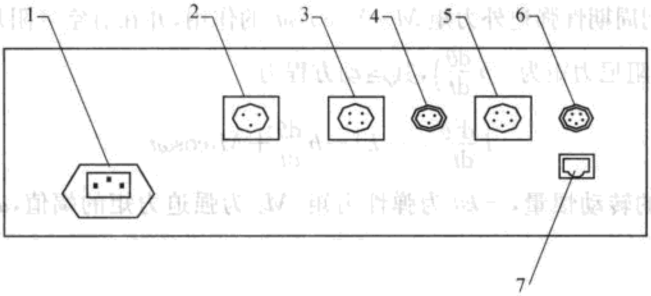


图 2.5.2 玻尔共振仪前面板示意图

电机转速调节旋钮,是带有刻度的十圈电位器,调节此旋钮时可以精确改变电机转



1. 电源插座(带保险);2. 闪光灯接口;3. 阻尼线圈;4. 电机接口;
5. 振幅输入;6. 周期输入;7. 通讯接口

图 2.5.3　玻尔共振仪后面板示意图

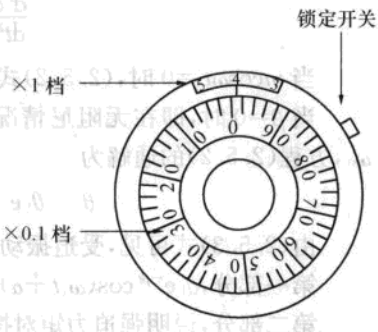


图 2.5.4　电机转速调节电位器

速,即改变强迫力矩的周期. 锁定开关处于图 2.5.4 所示的位置时,电位器刻度锁定,要调节大小须将其置于该位置的另一边. ×0.1 挡旋转一圈,×1 挡走一个字. 一般调节刻度仅供实验时作参考,以便大致确定强迫力矩周期值在多圈电位器上的相应位置.

可以通过软件控制阻尼线圈内直流电流的大小,达到改变摆轮系统的阻尼系数的目的. 阻尼档位的选择通过软件控制,共分 3 档,分别是"阻尼 1"、"阻尼 2"、"阻尼 3". 阻尼电流由恒流源提供,实验时根据不同情况进行选择(可先选择在"阻尼 2"处,若共振时振幅太小则可改用"阻尼 1"),振幅在 150°左右.

闪光灯开关用来控制闪光与否,当按住闪光按钮,摆轮长缺口通过平衡位置时便产生闪光,由于频闪现象,可从相位差读盘上看到刻度线似乎静止不动的读数(实际有机玻璃 F 上的刻度线一直在匀速转动),从而读出相位差数值. 为使闪光灯管不易损坏,采用按钮开关,仅在测量相位差时才按下按钮.

【实验原理】

物体在周期外力的持续作用下发生的振动称为受迫振动,这种周期性的外力称为强迫力. 如果外力是按简谐振动规律变化,那么稳定状态时的受迫振动也是简谐振动,此时,振幅保持恒定,振幅的大小与强迫力的频率和原振动系统无阻尼时的固有振动频率以及阻尼系数有关. 在受迫振动状态下,系统除了受到强迫力的作用外,同时还受到回复力和阻尼力的作用. 所以在稳定状态时物体的位移、速度变化与强迫力变化不是同相位的,存在一个相位差. 当强迫力频率与系统的固有频率相同时产生共振,此时振幅最大,相位差为 90°.

实验采用摆轮在弹性力矩作用下自由摆动,在电磁阻尼力矩作用下做受迫振动来研究受迫振动特性,可直观地显示机械振动中的一些物理现象.

当摆轮受到周期性强迫外力矩 $M=M_0\cos\omega t$ 的作用，并在有空气阻尼和电磁阻尼的媒质中运动时$\left(\text{阻尼力矩为}-b\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}\right)$，其运动方程为

$$I\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2}=-k\theta-b\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}+M_0\cos\omega t \tag{2.5.1}$$

式中，I 为摆轮的转动惯量，$-k\theta$ 为弹性力矩，M_0 为强迫力矩的幅值，ω 为强迫力的圆频率.

令

$$\omega_0^2=\frac{k}{I},\quad 2\beta=\frac{b}{I},\quad m=\frac{M_0}{I}$$

则(2.5.1)式变为

$$\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2}+\omega_0^2\theta+2\beta\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}=m\cos\omega t \tag{2.5.2}$$

当 $m\cos\omega t=0$ 时，(2.5.2)式即为阻尼振动方程.

当 $\beta=0$ 时，即在无阻尼情况时，(2.5.2)式变为简谐振动方程，系统的固有频率为 ω_0，方程(2.5.2)的通解为

$$\theta=\theta_1\mathrm{e}^{-\beta t}\cos(\omega_f t+\alpha)+\theta_2\cos(\omega t+\varphi_0) \tag{2.5.3}$$

由(2.5.3)式可见，受迫振动可分成两部分：

第一部分，$\theta_1\mathrm{e}^{-\beta t}\cos(\omega_f t+\alpha)$和初始条件有关，经过一定时间后衰减消失.

第二部分，说明强迫力矩对摆轮做功，向振动体传送能量，最后达到一个稳定的振动状态. 振幅为

$$\theta_2=\frac{m}{\sqrt{(\omega_0^2-\omega^2)^2+4\beta^2\omega^2}} \tag{2.5.4}$$

它与强迫力矩之间的相位差为

$$\varphi=\arctan\frac{2\beta\omega}{\omega_0^2-\omega^2}=\arctan\frac{\beta T_0^2 T}{\pi(T^2-T_0^2)} \tag{2.5.5}$$

由(2.5.4)式和(2.5.5)式可看出，振幅 θ_2 与相位差 φ 的数值取决于强迫力矩 m、频率 ω、系统的固有频率 ω_0 和阻尼系数 β 四个因素，而与振动初始状态无关.

由 θ_2 极值条件$\frac{\partial\theta_2}{\partial\omega}=0$ 可得出，当强迫力的圆频率 $\omega=\sqrt{\omega_0^2-2\beta^2}$ 时，产生共振，θ_2 有极大值. 若共振时圆频率和振幅分别用 ω_r、θ_r 表示，则

$$\omega_r=\sqrt{\omega_0^2-2\beta^2} \tag{2.5.6}$$

$$\theta_r=\frac{m}{2\beta\sqrt{\omega_0^2-2\beta^2}} \tag{2.5.7}$$

(2.5.6)式、(2.5.7)式表明，阻尼系数 β 越小，共振时圆频率越接近于系统固有频率，振幅也越大. 图 2.5.5 和图 2.5.6 分别表示在不同 β 时受迫振动的幅频特性和相频特性.

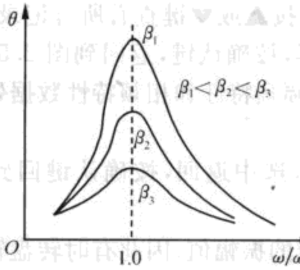


图 2.5.5

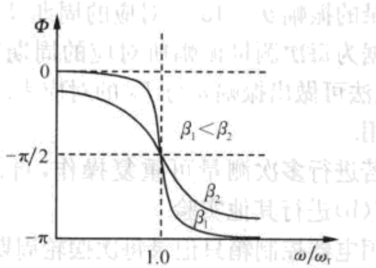


图 2.5.6

【实验内容】

1. 实验准备

按下电源开关后，屏幕上出现欢迎界面，其中 NO. 0000X 为电器控制箱与电脑主机相连的编号. 过几秒钟后屏幕上显示如图 2.5.7(a)“按键说明”字样. 符号“◀”为向左移动；“▶”为向右移动；“▲”为向上移动；“▼”向下移动. 下文中的符号不再重新介绍.

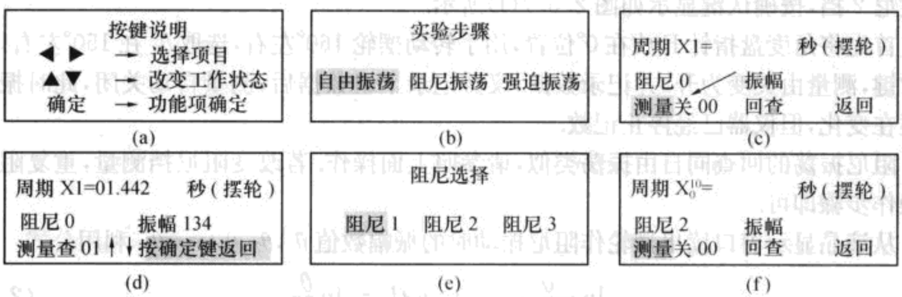


图 2.5.7

2. 选择实验方式

根据是否连接电脑选择联网模式或单机模式. 这两种方式下的操作完全相同，故不再重复介绍.

3. 自由振荡——摆轮振幅 θ 与系统固有周期的对应值的测量 T_0

自由振荡实验的目的，是为了测量摆轮的振幅 θ 与系统固有振动周期的关系.

在图 2.5.7(a)状态按确认键，显示图 2.5.7(b)所示的实验类型，默认选中项为自由振荡，字体反白为选中. 再按确认键显示如图 2.5.7(c)所示.

用手转动摆轮 160°左右，放开手后按▲或▼键，测量状态由关变为开，控制箱开始记录实验数据，振幅的有效数值范围为 50°～160°(振幅小于 160°测量开，小于 50°测量自动关闭). 测量显示关时，此时数据已保存并发送主机.

查询实验数据，可按◀或▶键，选中回查，再按确认键如图 2.5.7(d)所示，表示第一

次记录的振幅 $\theta_0=134°$，对应的周期 $T=1.442$s，然后按▲或▼键查看所有记录的数据，该数据为每次测量振幅所对应的周期数值，回查完毕，按确认键，返回到图 2.5.7(c)状态. 此法可做出振幅 θ 与 T_0 的对应表. 该对应表将在幅频特性和相频特性数据处理过程中使用.

若进行多次测量可重复操作，自由振荡完成后，选中返回，按确认键回到前面图 2.5.7(b)进行其他实验.

因电器控制箱只记录每次摆轮周期变化时所对应的振幅值，因此有时转盘转过光电门几次，测量才记录一次(其间能看到振幅变化). 当回查数据时，有的振幅数值被自动剔除了(当摆轮周期的第 5 位有效数字发生变化时，控制箱记录对应的振幅值. 控制箱上只显示 4 位有效数字，故学生无法看到第 5 位有效数字的变化情况，但在电脑主机上可以清楚的看到).

4. 测定阻尼系数 β

在图 2.5.7(b)状态下，根据实验要求，按▶键，选中阻尼振荡，按确认键显示阻尼，如图 2.5.7(e)所示. 阻尼分三个档次，阻尼 1 最小，根据自己实验要求选择阻尼挡. 例如，选择阻尼 2 挡，按确认键显示如图 2.5.7(f)所示.

首先将角度盘指针 F 放在 0°位置，用手转动摆轮 160°左右，选取 θ_0 在 150°左右，按▲或▼键，测量由关变为开，并记录数据，仪器记录十组数据后，测量自动关闭，此时振幅大小还在变化，但仪器已经停止记数.

阻尼振荡的回查同自由振荡类似，请参照上面操作. 若改变阻尼挡测量，重复阻尼一的操作步骤即可.

从液晶显示窗口读出摆轮作阻尼振动时的振幅数值 $\theta_1,\theta_2,\theta_3,\cdots,\theta_n$. 利用公式

$$\ln\frac{\theta_0 \mathrm{e}^{-\beta t}}{\theta_0 \mathrm{e}^{-\beta(t+nT)}}=n\beta T=\ln\frac{\theta_0}{\theta_n} \tag{2.5.8}$$

求出 β 值，式中 n 为阻尼振动的周期次数，θ_n 为第 n 次振动时的振幅，T 为阻尼振动周期的平均值. 此值可以测出 10 个摆轮振动周期值，然后取其平均值. 一般阻尼系数需测量 2～3次.

5. 测定受迫振动的幅度特性和相频特性曲线

在进行强迫振荡前必须先做阻尼振荡，否则无法实验.

仪器在图 2.5.7(b)状态下，选中强迫振荡，按确认键显示如图 2.5.8(a)所示，默认状态，选中电机.

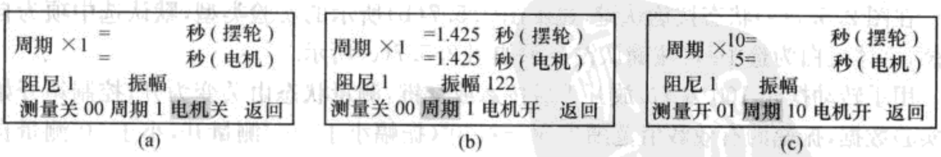


图 2.5.8

按▲或▼键，让电机启动. 此时保持周期为 1，待摆轮和电机的周期相同，特别是振幅已稳定，变化不大于 1，表明两者已经稳定了(图 2.5.8(b))，方可开始测量.

测量前应先选中周期，按▲或▼键把周期由 1(图 2.5.8(b))改为 10(图 2.5.8(c))，(目的是为了减少误差，若不改周期，测量无法打开). 再选中测量，按▲或▼键，测量打开并记录数据(图 2.5.8(c)).

一次测量完成，显示测量关后，读取摆轮的振幅值，并利用闪光灯测定受迫振动位移与强迫力间的相位差.

调节强迫力矩周期电位器，改变电机的转速，即改变强迫外力矩频率 ω，从而改变电机转动周期. 电机转速的改变可按照 $\Delta\phi$ 控制在 10° 左右来确定，可进行多次这样的测量.

每次改变了强迫力矩的周期，都需要等待系统稳定，约需两分钟时间，即返回到图 2.5.8(b)状态，等待摆轮和电机的周期相同，然后再进行测量.

在共振点附近由于曲线变化较大，因此测量数据相对密集些，此时电机转速的极小变化会引起数据的很大改变. 电机转速旋钮上的读数(例如 5.50)是一参考数值，建议在不同 ω 时都记下此值，以便实验中快速寻找要重新测量时参考.

测量相位时应把闪光灯放在电动机转盘前下方，按下闪光灯按钮，根据频闪现象来测量，仔细观察相位位置.

强迫振荡测量完毕后，按◀或▶键，选中返回，按确定键，重新回到图 2.5.7(b)状态.

6. 关机

在图 2.5.7(b)状态下，按住复位按钮保持不动，几秒钟后仪器自动复位，此时所做实验数据全部清除，然后按下电源按钮，结束实验.

【数据处理】

1. 摆轮振幅 θ 与系统固有周期 T_0 的关系(表 2.5.1)

表 2.5.1　振幅 θ 与固有周期 T_0 关系数据表

振幅 θ	固有周期 T_0/s	振幅 θ	固有周期 T_0/s	振幅 θ	固有周期 T_0/s	振幅 θ	固有周期 T_0/s

2. 阻尼系数 β 的计算

利用(2.5.9)式对所测数据(表 2.5.2)按逐差法处理，求出 β 值.

$$5\beta\overline{T} = \ln\frac{\theta_i}{\theta_{i+5}} \tag{2.5.9}$$

式中，i 为阻尼振动的周期次数，θ_i 为第 i 次振动时的振幅.

表 2.5.2 阻尼系数 β 测量数据表 阻尼挡位______

序 号	振幅 $\theta/(°)$	序 号	振幅 $\theta/(°)$	$\ln\frac{\theta_i}{\theta_{i+5}}$
θ_1		θ_6		
θ_2		θ_7		
θ_3		θ_8		
θ_4		θ_9		
θ_5		θ_{10}		
		$\ln\frac{\theta_i}{\theta_{i+5}}$平均值		

$10T=$____秒 $T=$____秒

3. 幅频特性和相频特性测量

(1) 将记录的实验数据填入表 2.5.3,并查询振幅 θ 与固有频率的对应表,获取对应的 T_0 值,也填入表 2.5.3.

表 2.5.3 幅频特性和相频特性测量数据表 阻尼挡位______

强迫力矩周期电位器刻盘度值	强迫力矩周期/s	相位差 $\varphi/(°)$读取值	振幅 $\theta/(°)$测量值	查表 2.5.1 得出的与振幅 θ 对应的固有频率 T_0

(2) 利用表 2.5.3 记录的数据,将计算结果填入表 2.5.4.

表 2.5.4

强迫力矩周期/s	$\varphi/(°)$读取值	$\theta/(°)$测量值	$\frac{\omega}{\omega_r}$	$\left(\frac{\theta}{\theta_r}\right)^2$	$\arctan\frac{\beta T_0^2 T}{\pi(T^2-T_0^2)}$

以 ω 为横轴,$(\theta/\theta_r)^2$ 为纵轴,作幅频特性曲线;以 ω/ω_r 为横轴,相位差 φ 为纵轴,作相频特性曲线.

在阻尼系数较小(满足 $\beta^2\ll\omega_0^2$)和共振位置附近($\omega=\omega_0$),由(2.5.4)式和(2.5.7)式可得出

$$\left(\frac{\theta}{\theta_r}\right)^2=\frac{\beta^2}{(\omega-\omega_0)^2+\beta^2}$$

据此可由幅频特性曲线求 β 值.

当 $\theta=\frac{\theta_r}{\sqrt{2}}$,由上式可得

$$\omega-\omega_0=\pm\beta$$

此 ω 对应于图 $\left(\frac{\theta}{\theta_r}\right)^2=\frac{1}{2}$ 处两个值 ω_1,ω_2,由此得出

$$\beta=\frac{\omega_2-\omega_1}{2}$$

将此法与逐差法求得的 β 值作一比较并讨论，本实验重点应放在相频特性曲线的测量.

【注意事项】

(1) 为保证使用安全，三芯电源线须可靠接地.

(2) 强迫振荡实验时，调节仪器面板〖强迫力周期〗旋钮，从而改变不同电机转动周期，该实验必须做 10 次以上，其中必须包括电机转动周期与自由振荡实验时的自由振荡周期相同的数值.

(3) 在作强迫振荡实验时，须待电机与摆轮的周期相同(末位数差异不大于 2)，即系统稳定后，方可记录实验数据. 每次改变了变强迫力矩的周期，都需要重新等待系统稳定.

(4) 因为闪光灯的高压电路和强光会干扰光电门采集数据，因此须待一次测量完成，显示测量关闭后，才可使用闪光灯读取相位差.

(5) 学生做完实验测量数据需保存后，才可在主机上查看特性曲线及振幅比值.

实验 2.6　用伸长法测钢丝的杨氏模量

力作用于物体所引起的效果之一是使受力物体发生形变，物体的形变可分为弹性形变和塑性形变. 固体材料的弹性形变又可分为纵向、切变、扭转、弯曲，对于纵向弹性形变可以引入杨氏模量来描述材料抵抗形变的能力. 杨氏模量是表征固体材料性质的一个重要的物理量，是工程设计上选用材料时常需涉及的重要参数之一. 杨氏模量一般只与材料的性质和温度有关，与其几何形状无关.

实验测定杨氏模量的方法很多，如拉伸法、弯曲法和振动法(前两种方法可称为静态法，后一种可称为动态法). 本实验用静态拉伸法测定金属丝的杨氏模量. 本实验提供了一种测量微小长度的方法，即光杠杆法. 光杠杆法可以实现非接触式的放大测量，且直观、简便、精度高.

【实验目的】

(1) 测定钢丝的杨氏模量.

(2) 掌握光杠杆的原理及其应用.

【实验器材】

杨氏模量仪、光杠杆、水准仪、螺旋测微器、钢卷尺.

【仪器介绍】

杨氏模量仪如图 2.6.1 所示，在底座上有螺旋丁，调节螺旋丁可使仪器取铅直位置. 底座上直立两根支柱，支柱上端有横梁，钢丝上端固定在横梁内的夹头 P 中，平台 H 用以

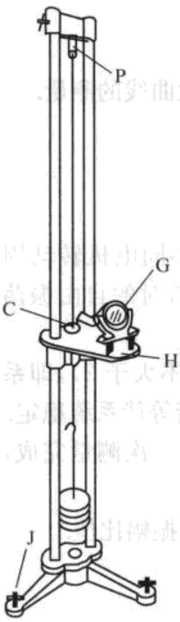


图 2.6.1

承托光杠杆 G 前方两足，平台中部有一圆孔，孔中有一夹紧钢丝且可以上下移动的圆柱体夹头 C，光杠杆的后足支在 C 上，夹头 C 的下端挂有码钩，以托砝码之用. 砝码的增减可使钢丝发生伸长或缩短的形变.

【实验原理】

1. 形变

任何物体在外力作用下都要产生形变，在弹性限度内，外力撤除后形变随之消失，物体恢复原状，这种形变叫做弹性形变. 超过某一限度时，撤除外力后形变不会完全消失，即有剩余形变，这个限度称为弹性限度. 固体材料的形变可分为四种，即纵向形变（伸长或压缩）、切变形变、扭转形变和弯曲形变，本实验只研究钢丝在弹性限度内受到拉力的伸长形变. 钢丝的伸长 ΔL 和原长之比 $\frac{\Delta L}{L}$ 叫做胁变，如果钢丝的截面积为 S，使钢丝伸长 ΔL 所需外力为 F，则作用在钢丝单位截面上的力 F/S 叫做胁强. 按照胡克定律，固体在弹性限度内胁强与胁变成正比，即

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha \frac{F}{S} \tag{2.6.1}$$

式中，α 为弹性系数，仅与金属丝的材料有关. 通常引用 α 的倒数 E 来表示材料的特性，即

$$E = \frac{1}{\alpha}$$

由(2.6.1)式可得

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{F}{ES}$$

故

$$E = \frac{LF}{S\Delta L} \tag{2.6.2}$$

式中，E 称为杨氏模量，它表示伸长（压缩）形变下各种材料的性能，$\Delta L/L$ 称为相对伸长.

2. 光杠杆原理

光杠杆原理如图 2.6.2 所示. 假定开始时平面镜 M 的法线 ON_1 在水平位置，则标尺 S 上的标度线 N_1 发出的光通过平面镜 M 反射进入望远镜，在望远镜中形成 N_1 的像而被观察到. 当加上质量为 $m$kg 的砝码，钢丝伸长 ΔL 后，光扛杆的主杆后足尖带动 M 转一角度 θ 至 ON'，而 OM 的法线 ON_1 也转同一角度 θ 至 ON'（即 ON' 为 OM' 的法

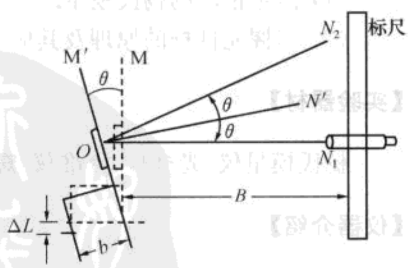


图 2.6.2 光杠杆原理

线),根据光的反射定律,从 N_1 发出的光将反射至 N_2,且$\angle N_1ON'=\angle N_2ON'=\theta$. 根据光线的可逆性,从 N_2 发出的光经平面镜反射后进入望远镜而被观察到. 由图 2.6.2 可得

$$\tan\theta=\frac{\Delta L}{b},\quad \tan2\theta=\frac{N_2-N_1}{B}=\frac{\Delta N}{B}$$

由于 θ 很小,所以

$$\tan\theta=\theta,\quad \tan2\theta=2\theta,\quad \theta=\frac{\Delta L}{b},\quad 2\theta=\frac{\Delta N}{B}$$

消去 θ,得

$$\Delta L=\frac{b}{2B}\Delta N \tag{2.6.3}$$

(2.6.3)式表明,由于 B 远大于 b,所以 ΔN 必定远大于 ΔL. 这样,利用光杠杆的原理就可以把微小的长度变化量 ΔL 转换成测量一个数值较大的标尺读数变化量 ΔN,实验时只要通过测量 b、B、ΔN 这些比较容易测准的量便可间接地测定 ΔL.

由上面的推导可知,(2.6.3)式成立的条件是 θ 角很小,光杠杆的初始状态必须是三足尖在一水平面上,平面镜竖直以及标尺保持竖直,否则,测出的 ΔL 误差较大.

将(2.6.3)式和 $F=mg$ 代入(2.6.2)式,得

$$E=\frac{8mgBL}{\pi d^2 b\Delta N} \tag{2.6.4}$$

式中,m 为砝码质量,g 为重力加速度(武汉地区为 $9.794\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$),$B$ 为镜面到标尺的距离,L 为钢丝的原长,d 为钢丝的直径,b 为光杠杆常数(光杠杆后足尖到前足尖连线的垂直距离),ΔN 为钢丝加减磅码后从望远镜里读出的标尺刻度变化量.

【实验内容】

1. 仪器调整

(1) 将待测钢丝装于架上,上端要特别注意固定牢固,调节支架底脚螺丝,使支架两支柱及待测钢丝处于铅直状态.

(2) 调节钢丝下端圆柱体 C,使钢丝能在平台 H 中间的孔中上下自由滑动,以免因摩擦影响钢丝的伸长. 在码钩上(带钩的砝码底盘为 1kg)挂上 1kg 砝码使钢丝拉直,此时上下夹头之间的钢丝长度即为其原长 L.

(3) 将光杠杆的两前足放在平台 H 的槽内,后足放在夹头 C 的中央,且注意不使后足与钢丝接触. 调整平台的上下位置,使光杠杆三足尖位于同一水平面上,让平面反射镜 M 与平台 H 大致垂直.

(4) 置望远镜(光轴大致水平)和标尺(竖直)在平面反射镜前方 1.5~2.0m 处,调节望远镜和光杠杆处于同一高度,要求此高度便于观察读数.

(5) 找标尺的像. 先从望远镜筒外侧沿镜筒方向在平面镜中找直尺的像,若找不到,应左右移动望远镜尺组,直到能在平面镜中看到标尺. 然后用望远镜去观察:先调节望远镜目镜清楚看到十字叉丝,再利用调焦手轮进行调焦,使标尺的反射像在望远镜内的十字叉丝平面上,并做到无视差,即当眼睛上下移动时,十字叉丝与标尺像之间没有相对移动.

(6) 细心调节光杠杆上平面镜的倾角及标尺的高度，使望远镜十字叉丝的横线与标尺零刻度线或标尺下方某一整数刻线重合.

2. 测量

(1) 按上述步骤调整好仪器后，注意在下面测量标尺读数的全过程中不能移动光杠杆测微系统.

(2) 记下标尺的初始读数 N_0，此时砝码钩悬挂重量为 m_0g. 依次每加载一个砝码(质量为 m)待稳定后，记下望远镜中的标尺读数 $N_1, N_2, \cdots, N_7$ 填入表 2.6.1 中. 然后逐次递减砝码，记下望远镜中相应的标尺读数 $N_7', N_6', \cdots, N_0'$，两组读数 N_i 和 N_i' 对应着相同的砝码重量，填入表 2.6.1 中.

表 2.6.1

测量次数 i	砝码质量/kg	增砝码时 N_i/cm	减砝码时 N_i'/cm	$N_i=\frac{N_i+N_i'}{2}$ /cm	$\Delta N_i=N_{i+4}-N_i$ /cm	ΔN 的标准偏差 $S_{\Delta N}$/cm
0	m_0					
1	m_0+m					
2	m_0+2m					
3	m_0+3m					$S_{\Delta N}=\sqrt{\frac{\sum(\Delta N_i-\overline{\Delta N})^2}{4-1}}$
4	m_0+4m					$=$
5	m_0+5m					
6	m_0+6m					
7	m_0+7m					
平均值					$\overline{\Delta N}=$	

(3) 用钢卷尺测量钢丝的原长 L 和平面反射镜与标尺之间的距离 B.

(4) 测量光杠杆常数 b. 将光杠杆取下放在平坦的纸上，轻压出三个足尖的印迹，用米尺或游标卡尺测出后足到两前足连线之间的垂直距离 b.

(5) 用螺旋测微器在钢丝的不同位置多次测量其直径 d，共测量 6 次，取 d 的平均值，填入表 2.6.2 中.

表 2.6.2　　螺旋测微器零点读数 $d_0=$____ cm

测量次数	1	2	3	4	5	6	平均值
d/cm							$\bar{d}=$____ cm
Δd/cm							$S_d=\sqrt{\frac{\sum(\Delta d)^2}{6-1}}=$____ cm

【数据处理】

1. 用逐差法计算 ΔN 的平均值 $\overline{\Delta N}$

将同一负荷下标尺读数的平均值分成两组 $\overline{N}_0, \overline{N}_1, \overline{N}_2, \overline{N}_3$ 和 $\overline{N}_4, \overline{N}_5, \overline{N}_6, \overline{N}_7$，分别计算出 $(\overline{N}_4-\overline{N}_0)$，$(\overline{N}_5-\overline{N}_1)$，$(\overline{N}_6-\overline{N}_2)$，$(\overline{N}_7-\overline{N}_3)$，则平均值为

$$\overline{\Delta N}=\frac{1}{4}\sum_{i=0}^{3}(\overline{N}_{i+4}-\overline{N}_i)$$

式中，$\overline{\Delta N}$相当于每增加 $4mg$ 砝码（m 为单个砝码的质量，可以是 1kg 或 0.5kg）时，标尺读数变化的平均值.

2. 计算杨氏模量的量值和不确定度

1）单次测量值

钢丝原长 $L\pm U_L$(m)

光杠杆常数 $b\pm U_b$(m)

镜面到标尺距离 $B\pm U_B$(m)

若测量值的不确定度取为仪器误差，则

$$U_L=\Delta_{L仪}=5\times10^{-4}\text{m}$$

$$U_b=\Delta_{b仪}=5\times10^{-4}\text{m}\quad（用游标卡尺测量时取它的允差）$$

$$U_B=\Delta_{B仪}=5\times10^{-4}\text{m}$$

2）多次测量值

钢丝的直径　　$d=\overline{d}\pm U_d$(m)

标尺读数　　$\Delta N=\overline{\Delta N}\pm U_{\Delta N}$(m)

计算不确定度时，B类不确定度取为仪器误差

$$\Delta_{d仪}=5\times10^{-6}\text{m}$$

$$\Delta(\Delta N_{仪})=5\times10^{-4}\text{m}$$

另外，荷载 $F=4mg\pm\Delta_{F仪}$(N)，式中，$\Delta_{F仪}$为单个砝码重量误差的 4 倍，由实验室给定.

3）计算金属丝的杨氏模量 E 和不确定度 U_E

（相关计算应列出计算公式，代入实验数据，再写出计算结果）.

4）实验结果表达

$$E=\overline{E}\pm U_E(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$$

$$U_r(E)=\frac{U_E}{\overline{E}}\%$$

3. 用图示法和最小二乘法处理数据

将(2.6.4)式改写为

$$\Delta N=\frac{8BLg}{\pi d^2bE}m=Km \tag{2.6.5}$$

式中

$$K=\frac{8BLg}{\pi d^2bE} \tag{2.6.6}$$

在既定实验条件下，K 是一个常量. 若以 $\Delta N_i=\overline{N}_i-\overline{N}_0(i=0,1,2,\cdots)$为纵坐标，$m_i$ 为横

坐标作图,应得一直线,其斜率为 K,用最小二乘法求得 K 后,可计算杨氏模量

$$E=\frac{8BLg}{\pi d^2 bK} \tag{2.6.7}$$

【注意事项】

(1) 在光杠杆、望远镜、标尺调整好之后,整个实验过程中不要有任何变动,特别是加减法码时要格外小心,轻放轻取.

(2) 注意保持金属丝的平直状态,螺旋测微器测量其直径时,勿将金属丝扭折. 如果实验前发现金属丝略有弯折,可在砝码托上先加一定数量的砝码,使金属丝处于伸直状态再做实验.

(3) 根据胡克定律,每次加减砝码的数值相同,金属丝的伸长(缩短)量也应基本相同. 实验过程中应随时注意检查所得数值,如有明显误差,可分析原因,及时纠正.

【预习思考】

(1) 光杠杆有什么优点? 怎样提高光杠杆测量微小长度变化的灵敏度? 灵敏度是否越高越好?

(2) 如果圆柱形夹具和平台圆孔间有摩擦力存在,对实验结果有何影响? 实验中如何减小这种影响?

(3) 为了能在望远镜中观察到清晰的标尺像,标尺中点、望远镜轴线及反射镜面法线之间应有怎样的关系?

(4) 为什么要采用增减砝码,且反向测量取平均值的方法进行测量?

【习题】

(1) 本实验中各个长度量为什么要使用不同的仪器来测量? 若采用同一量具钢卷尺,哪个测量值对杨氏模量的误差影响最大,为什么?

(2) 两根材料相同,粗细、长度不同的钢丝在相同的加载条件下,他们的伸长量是否一样? 杨氏模量是否相同?

(3) 用光杠杆法能否测量一块薄板的厚度? 若能,应如何测量? 如何用光杠杆装置来测量一微小角度 θ? 试推导其计算公式.

实验 2.7 声速的测定

声波是一种在弹性媒质中传播的机械波,它是纵波. 频率小于 20Hz 的声波为次声波,频率在 20Hz~20kHz 的为可闻声波,大于 20kHz 为超声波. 超声波具有波长短、易于定向发射等优点,而且超声波在媒质中的传播速度与媒质的特性和状态有关,通过媒质中声速的测定可了解媒质的特点,如气体的浓度,液体的流速,气体温度的瞬时变化,固体材料的弹性模量等,都可通过测定这些物质中的声速来实现. 声速的测量在声波定位、探伤、测距中有着广泛的应用. 在石油工业中,常用声波测井获取孔隙度等地层信息,在勘探中常用地震波勘测地层剖面寻找油层. 因此,声速的测量具有重要意义.

本实验利用超声波采用驻波法和相位法来测定空气中的声速.

【实验目的】

(1) 学会用驻波法和相位法测定空气中的声速.

(2) 了解压电换能器的功能,熟悉低频信号发生器和示波器的使用.

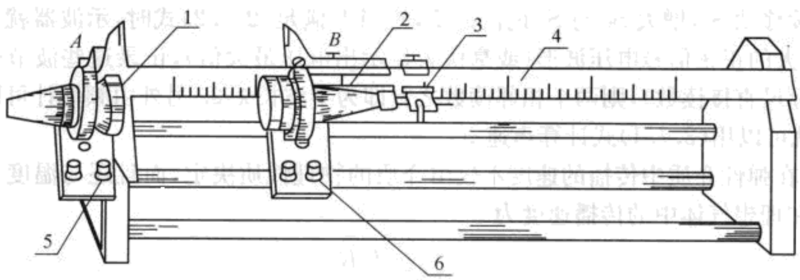
(3) 掌握用逐差法处理实验数据.

【实验器材】

声波驻波仪、低频信号发生器、数字频率计、毫伏表、示波器、屏蔽导线.

【仪器介绍】

声波驻波仪如图 2.7.1 所示,在量程为 50cm 游标尺的量爪上,相向安置两个固有频率相同的压电换能器. 移动游标及借助其微动装置就可精密地调节两换能器之间的距离 L.



1. 平面声波发生器; 2. 声波信号接收器; 3. 游标卡尺附尺;
4. 游标卡尺主尺; 5. 信号输入插孔; 6. 信号输出插孔

图 2.7.1 声波驻波仪

压电换能器是实现声波(机械振动)和电信号相互转换的装置,它的主要部件是压电陶瓷换能片. 当输给一个电信号时,换能器便按电信号的频率做机械振动,从而推动空气分子振动产生平面声波. 当它受到机械振动后,又会将机械振动转换为电信号.

压电换能器 S_1 作为平面声波发射器,电信号由低频信号发生器供给,电信号的频率读数由数字频率计读出;压电换能器 S_2 作为声波信号的接收器被固定于游标尺的附尺上,转换的电信号由毫伏表指示(或通过示波器进行观测). 为了在两换能器的端面间形成驻波,两端面必须严格平行.

2.7.1 驻波法测声速

【实验原理】

声波是一种在弹性媒质中传播的机械波,它和声源振动的频率 f、波长 λ 有如下关系:

$$v = f\lambda \tag{2.7.1}$$

如果已知声源振动的频率 f,只要测定声波在空气中的波长 λ,即可由上式求得空气中的声速.本实验采用驻波法测定声波在空气中的波长 λ.

两列振幅相同传播方向相反的相干波叠加形成驻波,它不受两个波源之间距离等条件的限制.驻波的强度和稳定性因具体条件不同而有很大差异.只有当波源的频率和驻波系统的固有频率相等时,驻波振幅才达到最大值,该现象称为驻波共振.

在驻波法实验中,超声发射器 S_1 和接收器 S_2 的两端面是严格平行的.因此,由 S_1 发出的平面声波,经过空气传播到达接收器 S_2 后,入射波即在接收面上垂直反射,入射波与反射波相干涉形成驻波,反射面处于位移的波节.改变 S_1、S_2 端面之间的距离 L,当 S_1、S_2 端面间距 L 恰好等于超声波半波长的整数倍时,即

$$L = n\frac{\lambda}{2} \quad (n = 1,2,3,\cdots) \tag{2.7.2}$$

在 S_1、S_2 之间的介质中出现稳定的驻波共振现象,此时驻波幅度达到极大;同时,在接收面上的声压波腹也相应地达到极大值,转化为电信号时,电信号的幅值也会达到极大值.因此,连续移动 S_2,增大 S_1 与 S_2 的间距 L,每当 L 满足(2.7.2)式时,示波器就显示出信号幅值最大的正弦信号电压波形(或毫伏表显示出电压最大值),记录这些波节(S_2)的坐标(由游标尺直接读数),则两个相邻读数之差即为半波长 $\lambda/2$.另外由频率计可以监测到频率 f,就可以用(2.7.1)式计算声速 v.

声波在弹性介质中传播的速度不仅由介质的物理性质决定,而且还与温度有密切关系.声波在理想气体中的传播速度为

$$v = \sqrt{\frac{T\gamma R}{\mu}} \tag{2.7.3}$$

式中,R 为气体常数($R=8.314\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$),$\mu$ 为相对分子质量,$\gamma=c_p/c_V$ 为气体定压比热容与定容比热容之比,T 为绝对温度.由此可见,影响声速的主要因素是温度,显然有

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{\frac{T\gamma R}{\mu}} = \sqrt{(273.15+t)\frac{\gamma R}{\mu}} = \sqrt{273.15\frac{\gamma R}{\mu}}\sqrt{\left(1+\frac{t}{273.15}\right)\frac{\gamma R}{\mu}} \\ &= v_0\sqrt{\left(1+\frac{t}{273.15}\right)\frac{\gamma R}{\mu}} \end{aligned} \tag{2.7.4}$$

式中,$v_0=331.45\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,它为0℃时的声速,$t$ 为摄氏温度.

由(2.7.6)式可计算出 t 等于任一温度时,声波在理想气体中的传播速度.

【实验内容】

(1) 仪器接线柱连接.用屏蔽导线将压电换能器 S_1 的输入接线柱与低频信号发生器的输出接线柱连接,用屏蔽导线将压电换能器 S_2 的输出接线柱与毫伏表的输入接线柱连接,再将低频信号发生器的输出端与数字频率计的输入端相连.

(2) 接通仪器电源,使仪器预热 15min 左右,并置好仪器的各旋钮.毫伏表的量程开关先置于 3V 挡,然后根据情况随时调节.

(3) 移动游标尺的附尺(连同换能器 S_2),使换能器 S_2 与换能器 S_1 接近但不要接触.

将低频信号发生器的频率调节旋钮由低端到高端非常缓慢地旋转，并观察毫伏表的指示变化，当指示数值达到最大时，此时信号频率即为换能器谐振频率 f，在实验中应保持 f 不变(不动频率调节旋钮).

此步的目的在于找到一个适当频率，使换能器工作在谐振状态，从而提高测量灵敏度. 换能器的谐振频率一般为 25～38kHz.

(4) 极缓慢地调节游标尺的附尺，使换能器 S_2 缓慢地离开换能器 S_1，同时仔细观察毫伏表上的读数，当出现一个较大的指示数时便紧固游标尺 3 上的螺钉，随后旋转 3 下面的螺母进行微调，使毫伏表的读数达到最大值，即为波节处，记录此时的波节位置(游标尺示数) x_1，频率 f_1；然后逐渐增大 x，依次记录后 15 个波节的位置 x_n 及相应的频率 f_n，填入表 2.7.1 中. 用逐差法处理数据，求出 $\lambda/2$，并求出 $\bar{f}$(虽然测量时不调节信号发生器的频率，但由于输出信号的频率会有微小波动，因此要求记录每次测量 x 时的频率值).

表 2.7.1　驻波法测声速数据表　　$t=$ ___ ℃

序　号	f_0/Hz	x_n/cm	$l_n(=x_{n+8}-x_n)$/cm
1			$l_1=x_9-x_1=$
2			$l_2=x_{10}-x_2=$
3			$l_3=x_{11}-x_3=$
4			$l_4=x_{12}-x_4=$
5			$l_5=x_{13}-x_5=$
6			$l_6=x_{14}-x_6=$
7			$l_7=x_{15}-x_7=$
8			$l_8=x_{16}-x_8=$
9			$\bar{l}=\frac{1}{8}\sum l_n=$ ___ cm $\bar{\lambda}=\bar{l}/4=$ ___ cm $\bar{f}=$ ___ Hz
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			

$v_{测}=$ ___ $m \cdot s^{-1}$
$v_{理}=$ ___ $m \cdot s^{-1}$
$E=\frac{|v_{测}-v_{理}|}{v_{理}}\times 100\%=$ ___

(5) 因为声速与温度有关，应记录室温. 由 $\bar{f}$ 和 λ 求出室温下的声速.

【预习思考】

(1) 本实验中驻波共振现象是怎样形成的?

(2) 两列波在空间相遇时产生驻波的条件是什么? 如果发射面 S_1 与接收面 S_2 不平行，结果会怎样?

(3) 实验测量前为什么先要调整测试系统的谐振频率? 怎样调整谐振频率?

(4) 当两压电换能器端面间的距离较远且接受信号又较弱时，如果毫伏表的量程太大不便于观察，应当如何处理？

【习题】

(1) 在用驻波法测间距 L 时，为何只测位移波节间的距离而不测位移波腹间的距离？

(2) 本实验装置可用做温度计吗？如果 L 的测量精度为 0.002mm，在频率不变的情况下，能测到的最小温度变化是多少？

2.7.2 相位法测声速

【实验原理】

如图 2.7.2 所示，当声波沿 Oy 轴传播时，y 轴上各点的相位均落后于波源 O. 设 O 点的振动方程为

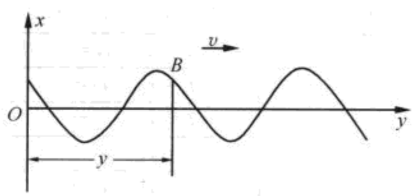


图 2.7.2

$$x_O = A\cos\omega t \tag{2.7.5}$$

则任一点 B 的振动方程为

$$x_B = A\cos\left[\omega\left(t - \frac{y}{v}\right)\right] \tag{2.7.6}$$

式中，v 为传播速度，y 为 B 点的坐标(即 O、B 两点间的距离).

B 点与 O 点的相位差为

$$\Delta\varphi = \omega\frac{y}{v} = 2\pi\frac{y}{\lambda} \tag{2.7.7}$$

当 $y=n\frac{\lambda}{2}$时，有

$$\Delta\varphi = n\pi \quad (n = 1,2,3,\cdots) \tag{2.7.8}$$

因此，实验时通过改变发射器 S_1 和接收器 S_2 之间的距离，观察相位的变化，即可确定半波长. 显然，每改变半个波长，相位差就变化 π.

通过示波器观察相位差. 随着两振动的相位差从 0→π 变化，图形从斜率为正的直线变为椭圆再变到斜率为负的直线. 选择判断比较灵敏的李萨如图形为直线的位置作为测量的起点，每移动半个波长就会重复出现斜率符号相反的直线. 总之，当 S_1 和 S_2 两端面之间的距离符合(2.7.8)式时，在示波器上就会出现一条通过原点的直线，该直线视 n 为奇数或者是偶数而分别位于二、四象限或者一、三象限. 实验如果以位于一、三象限的直线作为标记开始，则在二、四象限出现直线时，振动状态传播的距离即为 $\lambda/2$.

【实验内容】

(1) 声波驻波仪(图 2.7.1)，用屏蔽导线将压电换能器 S_1 的输入接线柱与低频信号发生器的输出接线柱连接，同时在低频信号发生器输出端接上数字频率计和示波器的“X 轴输入”端；用屏蔽导线将压电换能器 S_2 的输出接线柱与示波器的“Y 轴输入”端连接.

(2) 接通仪器电源,使仪器预热 15min 左右,放置好仪器的各旋钮.

示波器各旋钮的位置:"Y 轴衰减"、"X 轴衰减"均置于"10"档;"X 轴增幅"、"Y 轴增幅"暂置于"2"档,实验中根据图形的变化随时调整;"扫描范围"置于"关"档,其他旋钮可任意放置.

(3) 移动游标尺的附尺,使压电换能器 S_1、S_2 接近.

(4) 将低频信号发生器的频率刻度盘从频率刻度的低端到高端,极缓慢地旋转,并观察示波器的波形变化,此时应为椭圆或直线. 当波形幅值达到极大时,从频率计上记录下频率读数,并保持低频信号发生器的输出频率不变.

(5) 极缓慢地调节游标尺的附尺(可调附尺上的微调),使压电换能器 S_2 缓慢离开压电换能器 S_1. 每当示波器上出现直线图形时,从游标上读出此时的位置 x_n,及记录相应的频率 f_n,共测 16 组数据,填入预先设定的表格中(同表 2.7.1).

(6) 按实验步骤(3)、(4)、(5)重做一次,记录好各次数据,并记录室温.

(7) 用逐差法处理实验数据,由(2.7.1)式计算室温下的声速.

【预习思考】

(1) 相位法为什么选直线图形作为测量基准? 从斜率为正的直线变到斜率为负的直线过程中相位改变了多少?

(2) 两个相邻同样图像之间的相位差是多少? 在此情况下,S_1、S_2 端面间的距离是多长?

(3) 为什么不测量单个的 $\lambda/2$ 或 λ,而要测量多个? 在计算 $\lambda/2$ 或 λ 时,将所测数据首尾相减,再除以 $\lambda/2$ 或 λ 的个数,这种计算方法与逐差法比较,哪一种较好?

【习题】

(1) 比较相位法与驻波法测声速的异同.

(2) 本实验装置可以用来校准信号源的频率吗? 试述必要条件和做法.

实验 2.8　用稳态平板法测定不良导体的导热系数

导热系数是表征物质热传导性质的物理量. 材料结构的变化与所含杂质的不同对材料导热系数数值都有明显的影响,因此材料的导热系数常常需要由实验去具体测定.

测量导热系数的实验方法一般分为稳态法和动态法两类. 在稳态法中,先利用热源对样品加热,样品内部的温差使热量从高温向低温处传导,样品内部各点的温度将随加热快慢和传热快慢的影响而变动;当适当控制实验条件和实验参数使加热和传热的过程达到平衡状态,则待测样品内部可能形成稳定的温度分布,根据这一温度分布就可以计算出导热系数. 而在动态法中,最终在样品内部所形成的温度分布是随时间变化的,如呈周期性的变化,变化的周期和幅度亦受实验条件和加热快慢的影响,与导热系数的大小有关. 本实验采用稳态法进行测量.

【实验目的】

(1) 用稳态平板法测定不良导体的导热系数.

(2) 利用物体的散热速率求传热速率.

【实验器材】

实验装置、红外灯、调压器、杜瓦瓶、数字式电压表.

【仪器介绍】

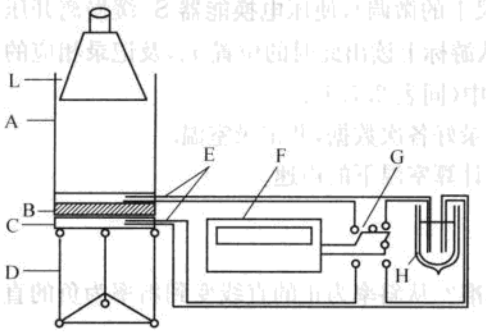


图 2.8.1

本实验装置如图 2.8.1 所示，在支架 D 上先后放上圆铜盘 C、待测样品 B 和厚底紫铜圆筒 A，在 A 的上方用红外灯 L 加热，使样品上、下表面各维持稳定的温度了 T_1、T_2，它们的数值分别用各自的热电偶 E 来测量，E 的冷端浸入盛于杜瓦瓶 H 内的冰水混合物中. G 为双刀双向开关，用以变换上、下热电偶的测量回路，数字式电压表 F 用以测量温差电动势.

【实验原理】

导热是物体相互接触时，由高温部分向低温部分传播热量的过程. 当温度的变化只是沿着一个方向(设 z 方向)进行时，热传导的基本公式可写为

$$\mathrm{d}Q=-\lambda\left(\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}z}\right)_{z_0}\mathrm{d}S\cdot\mathrm{d}t \tag{2.8.1}$$

它表示在 $\mathrm{d}t$ 时间内通过 $\mathrm{d}S$ 面积的热量为 $\mathrm{d}Q$，$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}z}$ 为温度梯度，λ 为导热系数，它的大小由物体本身的物理性质决定，单位为 $\mathrm{W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}}$，它是表征物质导热性能大小的物理量，式中负号表示热量传递向着温度降低的方向进行.

在图 2.8.2 中，B 为待测物，它的上下表面分别和上下铜盘接触，热量由高温铜盘通过待测物 B 向低温铜盘传递. 若 B 很薄，则通过 B 侧面向周围环境的散热量可以忽略不计，视热量只沿着垂直待测板 B 的方向传递. 那么，在稳定导热(即温度场中各点的温度不随时间而变)的情况下，在 Δt 时间内，通过面积为 S、厚度为 L 的匀质圆板的热量为

$$\Delta Q=-\lambda\frac{\Delta T}{L}S\cdot\Delta t \tag{2.8.2}$$

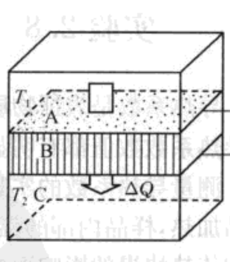


图 2.8.2

式中，ΔT 为匀质圆板两板面的恒定温差. 若把(2.8.2)式写成

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t}=-\lambda\frac{\Delta T}{L}S \tag{2.8.3}$$

的形式，那么$\frac{\Delta Q}{\Delta t}$便为待测物的导热速率，只要知道了导热速率，由(2.8.3)式即可求出 λ.

实验中，使上铜盘 A 和下铜盘 C 分别达到恒定温度 T_1、T_2，并设 $T_1 > T_2$，即热量由上而下传递，通过下铜盘 C 向周围散热. 因为 T_1 和 T_2 不变，所以，通过 B 的热量就等于 C 向周围散发的热量，即 B 的导热速率等于 C 的散热速率. 因此，只要求出了 C 在温度 T_2 时的散热速率，就求出了 B 的导热速率$\frac{\Delta Q}{\Delta t}$.

因为 C 的上表面和 B 的下表面接触，所以 C 的散热面积只有下表面面积和侧面积之和，设为 S_m. 而实验中冷却曲线是 C 全部裸露于空气中测出来的，即在 C 的上下表面和侧面都散热的情况下记录出来的. 设其全部表面积为 $S_全$，根据散热速率与散热面积成正比的关系可得

$$\frac{\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_{部}}{\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_{全}} = \frac{S_{部}}{S_{全}} \tag{2.8.4}$$

式中，$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_{部}$ 为 $S_部$ 面积的散热速率，$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_{全}$ 为 $S_全$ 面积的散热速率. 而散热速率 $\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_{部}$ 就等于(2.8.3)式中的导热速率$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)$，这样(2.8.3)式便可写作

$$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_{部} = -\lambda \frac{\Delta T}{L} S \tag{2.8.5}$$

设下铜盘直径为 D，厚度为 δ，那么有

$$S_{部} = \pi\left(\frac{D}{2}\right)^2 + \pi D\delta$$

$$S_{全} = 2\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2 + \pi D\delta \tag{2.8.6}$$

由比热容的基本定义 $c=\frac{\Delta Q}{m\Delta T'}$，得 $\Delta Q = cm\Delta T'$，故

$$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_{全} = \frac{cm\Delta T'}{\Delta t} \tag{2.8.7}$$

将(2.8.6)式、(2.8.7)式代入(2.8.4)式得

$$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_{部} = \frac{D+4\delta}{2D+4\delta} cmK \tag{2.8.8}$$

将(2.8.8)式代入(2.8.5)式得

$$\lambda = \frac{-cmKL(D+4\delta)}{\pi D^2 (T_1 - T_2)(D+2\delta)/2} \tag{2.8.9}$$

式中，m 为下铜盘的质量，c 为下铜盘的比热容.

【实验内容】

(1) 用游标卡尺多次测量下铜盘的直径 D、厚度 δ 和待测物厚度 L，然后取其平均值. 下铜盘质量 m 由天平称出，其比热容 $c = 3.850 \times 10^2 \mathrm{J \cdot (kg \cdot ℃)^{-1}}$.

(2) 安置圆筒、圆盘时，须使放置热电偶的洞孔与杜瓦瓶、数字毫伏计位于同一侧. 热电偶插入小孔时，要抹些硅油，并插到洞孔底部，使热电偶测温端与铜盘接触良好. 热电偶冷端插在滴有硅油的细玻管内，再将玻管浸入冰水混合物中.

(3) 根据稳态法，必须得到稳定的温度分布，这就要等待较长的时间，为了提高效率，可先将红外灯的电源电压升高到 180～200V，加热约 20min 后再降至 130～150V. 然后，每隔 5min 读一下温度示数，如在一段时间内(如 10min)样品上、下表面温度 T_1、T_2 示数都不变，即可认为已达到稳定状态. 记录稳态时 T_1、T_2 值后，移去样品，再加热. 当下铜盘温度比 T_2 高出 10℃左右时，移去圆筒，让下铜盘自然冷却. 每隔 30s 读一次下铜盘的温度示数，最后选取邻近 T_2 的测量数据来求出冷却速率.

(4) 本实验选用铜—康铜热电偶测温度，温差 100℃时，其温差电动势约 4.0mV，故应配用量程 0～10mV，并能精确到 0.01mV 的数字电压表. 由于热电偶冷端温度为 0℃，对一定材料的热电偶而言，当温度变化范围不太大时，其温差电动势(mV)与待测温度(℃)的比值是一个常数. 因此，在用(2.8.9)式计算时，可以直接以电动势值代表温度值.

(5) 计算导热系数 λ.

【注意事项】

(1) 上下铜盘侧面的小孔内要放置导热性能好的油脂，如黄油等，热电偶要完全插入油中底部，以保证热电偶接点和铜盘接触良好.

(2) 红外灯的电源电压不得超过 210V.

【预习思考】

(1) 什么叫稳定导热状态？如何判定实验达到了稳定导热状态？

(2) 待测圆板是厚一点好，还是薄一点好？为什么？

(3) 如何根据冷却曲线来求出温度 T_2 下的冷却速率 K？

(4) 实验中热电偶的冷端是否一定要放在冰水混合物中？有什么条件限制？

【习题】

(1) 使用(2.8.2)式的主要条件是什么？为了达到这个条件，实验应该注意什么？

(2) 实验过程中，环境温度的变化对实验有无影响？为什么？

(3) 本实验方法可否用来测量良导体的导热系数？为什么？

实验 2.9　冷却法测量金属的比热容

比热容是物质物理性质的重要参量，在研究物质结构、确定相变、鉴定物质纯度等方面起着重要作用. 根据牛顿冷却定律用冷却法测定金属或液体的比热容，是量热学中常用的方法之一. 若已知标准样品在不同温度时的比热容，通过作冷却曲线即可测得各种金属在不同温度时的比热容.

【实验目的】

(1) 测量金属的比热容.

(2) 了解金属的冷却速率与环境之间的温差关系,以及进行测量的实验条件.

【仪器介绍】

本实验装置为冷却法金属比热容测量仪,如图 2.9.1 所示. 其中,实验样品是直径 5mm、长 30mm 的小圆柱,其底部深孔中安放铜—康铜热电偶(其热电势约 0.042mV · ℃$^{-1}$),而热电偶的冷端则安放在冰水混合物中,其输出电压(温度)由实验仪中的数字电压表读出,当冷端为冰点时,由数字电压表显示的 mV 数即对应待测温度值. 加热器采用 75W 电烙铁改制而成,利用底盘支撑固定并可自由升降. 仪器内设有自动控制限温装置,防止因长期不切断加热电源而引起温度不断升高. 被测样品安放在有较大容量的防风圆筒即样品室内,以使高于室温的样品自然冷却. 本实验装置可测量金属在室温至 200℃各种温度时的比热容.

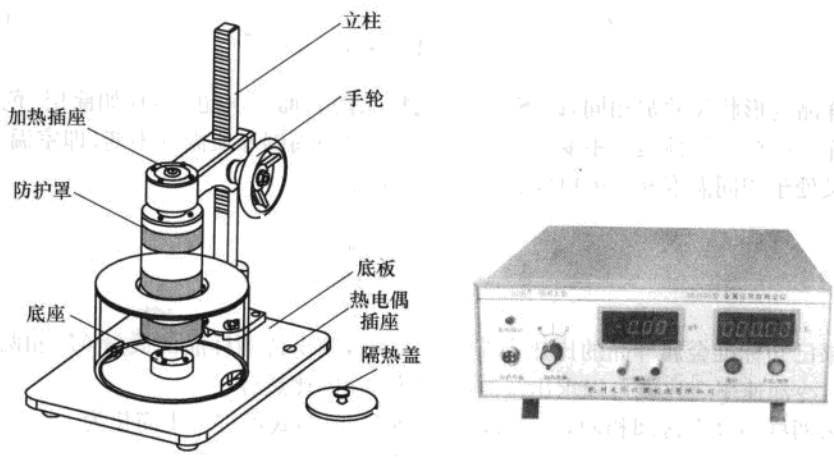


图 2.9.1

【实验原理】

单位质量的物质,其温度升高 1K(或 1℃)所需的热量叫做该物质的比热容,其值随温度而变化. 将质量为 M_1 的金属样品加热后,放到较低温度的介质(如室温的空气)中,样品将会逐渐冷却. 其单位时间的热量损失($\Delta Q/\Delta t$)与温度下降的速率成正比,于是得到下述关系式:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t}=C_1M_1\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta t}\right)_1 \tag{2.9.1}$$

式中,C_1 为该金属样品在温度 θ_1 时的比热容,$\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta t}\right)_1$ 为金属样品在温度为 θ_1 时的温度下

降速率，根据冷却定律有

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t}=a_1S_1(\theta_1-\theta_0)^m \tag{2.9.2}$$

式中，a_1 为热交换系数，S_1 为该样品外表面的面积，m 为常数，θ_1 为金属样品的温度，θ_0 为周围介质的温度．由(2.9.1)式和(2.9.2)式，可得

$$C_1M_1\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta t}\right)_1=a_1S_1(\theta_1-\theta_0)^m \tag{2.9.3}$$

同理，对质量为 M_2，比热容为 C_2 的另一种金属样品，有

$$C_2M_2\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta t}\right)_2=a_2S_2(\theta_2-\theta_0)^m \tag{2.9.4}$$

由(2.9.3)式和(2.9.4)式可得

$$\frac{C_1M_1\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta t}\right)_1}{C_2M_2\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta t}\right)_2}=\frac{a_1S_1(\theta_1-\theta_0)^m}{a_2S_2(\theta_2-\theta_0)^m}$$

$$C_2=C_1\frac{M_1\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta t}\right)_1a_2S_2(\vartheta_2-\theta_0)^m}{M_2\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta t}\right)_2a_1S_1(\theta_1-\theta_0)^m} \tag{2.9.5}$$

如果两样品的形状尺寸都相同，即 $S_1=S_2$，两样品的表面状况也相同(如涂层、色泽等)，而周围介质(空气)的性质也不变，则有 $a_1=a_2$．于是当周围介质温度不变(即室温 θ_0 恒定而样品又处于相同温度 $\theta_1=\theta_2$)时，上式可以简化为

$$C_2=C_1\frac{M_1\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta t}\right)_1}{M_2\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta t}\right)_2} \tag{2.9.6}$$

如果已知标准金属样品的比热容 C_1，质量 M_1，测出待测样品的质量 M_2 和两样品在温度 θ 时冷却速率之比就可以求出待测的金属材料的比热容 C_2．

如果两样品降温区间相同，即 $\Delta\theta_1=\Delta\theta_2$，则(2.9.6)式可进一步简化为

$$C_2=C_1\frac{M_1\Delta t_2}{M_2\Delta t_1} \tag{2.9.7}$$

只要测出两样品的质量 M_1、M_2 及两样品在相同降温区间内的降温时间 Δt_1、Δt_2，就可求出待测金属材料的比热容 C_2．已知铜在100℃时的比热容为：$C_{Cu}=393\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot℃)^{-1}$．

【实验内容】

1．测量铁和铝在100℃时的比热容

(1) 选取长度、直径、表面光洁度尽可能相同的三种金属样品(铜、铁、铝)用电子天平或物理天平称出它们的质量 M_0．再根据 $M_{Cu}>M_{Fe}>M_{Al}$ 这一特点，把它们区别开来．

(2) 使热电偶端的铜导线与数字表的正端相连，冷端铜导线与数字表的负端相连．当数字电压表读数为某一定值即200℃(8.5～9mV)时，切断加热电源移去加热源，样品继续放在有机玻璃圆筒内自然冷却(室温较高用电风扇时，加温时在有机玻璃圆筒上盖好大

盖板,移去加热源时,盖好小盖板).当温度降到接近102℃时开始记录,测量样品从102℃降到98℃所需要时间Δt.按铁、铜、铝的次序,分别测量其降温时间,每一样品重复测量5次.

2. 测量铁和铝在200℃时的比热容(选做)

【注意事项】

(1) 仪器红色指示灯亮,表示连接线未连好或加热温度过高(超过200℃),仪器已自动保护.

(2) 测量降温时间时,按"计时"或"暂停"按钮应迅速、准确,以减小人为计时误差.

(3) 实验中热电偶冷端温度一定要保持在零度.

(4) 样品放在有机玻璃圆筒内自然冷却时,筒口须盖上盖子.

【习题】

(1) 可否利用本实验中的方法测量金属在任意温度时的比热容?

(2) 测量三种金属的冷却规律,并在坐标纸上画出冷却曲线.如何求出它们在同一温度点的冷却速率?

(3) 分析本实验中哪些因素会引起误差?测量时应怎样才能减小误差.

实验2.10 热电偶温度计的标度

如果两种不同成分的均质导体形成回路,当两端存在温差时,就会在回路中产生电流,那么两端之间就会存在Seebeck热电势,即塞贝克效应.热电势的大小只与热电偶导体材质和两端温差有关,与热电偶导体的长度、直径无关.

热电偶具有构造简单、适用温度范围广、使用方便、承受热、机械冲击能力强以及响应速度快等特点,常用于高温区域、振动冲击大等恶劣环境以及适合于微小结构测温场合.

【实验目的】

(1) 了解热电偶温度计.

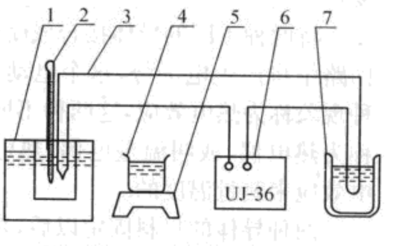
(2) "铜-康铜"热电偶温度计的标度.

【实验器材】

"铜-康铜"热电偶、恒温水浴、冰水瓶、电炉、烧杯、毫伏表、水银温度计.

【仪器介绍】

实验装置如图2.10.1所示.



1. 恒温水浴; 2. 水银温度计; 3. 热电偶; 4. 烧杯; 5. 电炉; 6. 毫伏表; 7. 冰水瓶

图2.10.1

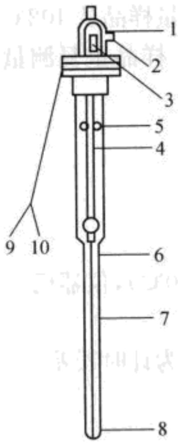


图 2.10.2

"铜-康铜"热电偶的一个接点(冷端)放在盛有冰和水的保温瓶中,使该接点维持在恒定的 0℃. 另一接点(热端)放在恒温水浴的内筒中. 恒温水浴升温由它的加热器来实现,(接通恒温水浴上的"加热开关"即自行加热),加热温度由电节点温度计控制. 沸水由电炉加热得到.

电节点温度计(也称为导电温度计)常与温度控制器配合使用,以使控制系统的温度在某一给定值. 电节点温度计的结构如图 2.10.2 所示,它的下端 8 是一普通水银温度计,水银柱 7 接有一导线引至接线头 9. 上端有一帽形磁铁 1,松开小螺丝 2 转动 1 时,就带动了标志 5 上下移动. 这是因为,在细丝杆 4 的上端固定着一小块软铁 3,它被封在玻璃管内,当 1 转动时,由于磁力作用,小铁块也随之转动,带动丝杆 4 转动. 标志 5 与丝杆 4 是细纹配合的,它受到玻璃管的限制,不能转动. 细金属丝 6 是焊在 5 上的,当 5 向上或向下移动时,6 也随之上下. 6 的长度是事先调好的,当 5 指在 t℃时,它的下端正好在水银温度计的 t℃处. 丝杆 4 也接有一导线引至接线头 10.

如果将电节点温度计调到 t℃,并将它插入系统中,当系统的温度低于 t℃时,水银柱 7 与细金属丝 6 是分离的,9、10 输出的是一断路信号,控制器接收此断路信号后,继续接通电源,使系统温度继续上升. 当系统的温度升高到 t℃时,7 与 6 接通,9、10 输出一短路信号,控制 10 接受此短路信号后,切断电源,使系统的温度得到稳定.

【实验原理】

温度是表征热力学系统冷热程度的物理量,温度的数值表示法叫做温标. 摄氏温标是一种常用的温标,摄氏温标规定冰点(指纯水和纯冰在一个标准大气压下达到平衡时的温度,而纯水中有空气溶解在内并达到饱和)为 0℃,沸点(指纯水和水蒸气在蒸汽压为一个标准大气压下达到平衡时的温度)为 100℃.

当温度改变时,物质的某些物理属性,如一定容积气体的压力、金属导体的电阻、两种金属导体组成热电偶的热电动势等,都会发生变化. 一般来说,任一物质的任一物理属性只要随温度的改变而发生单调的、显著的变化,都可以选用作标准温度,即制作温度计.

将两种不同的导体接合成闭合回路,如图 2.10.3 所示,若接点"1"和"2"的温度不同,回路中将产生电动势,这个电动势就称为热电动势,这种现象称为热电效应,这两种不同的金属导体的组合就称为热电偶,或叫温差电偶. 热电偶温度计就是利用热电效应来测量温度的.

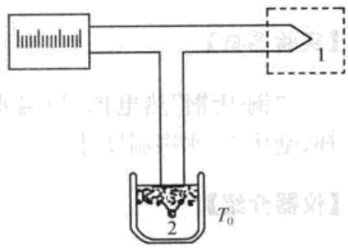


图 2.10.3

两种导体的材料固定以后,热电动势由接点的温度差所确定,即温差已知时,热电势随之确定,反之亦然. 若我们把热电偶的一个接点放在温度 T_0 为已知的恒温物质(如冰水或大气)中,另一点放在待测温度 T 中(图

2.10.3),那么测量出热电动势U就可以决定待测温度T.

为了能够从测量热电动势U值中直接得出待测温度T值,必须对所用的热电偶测定其热电动势U与温度T的关系,这就是热电偶温度计的定标.本实验是对"铜-康铜"热电偶温度计的定标.在测定U-T关系时,采用摄氏温标规定的两个固定点,即溶冰点(0℃)和沸水点(100℃),再在0~100℃取若干温度点,给出0~100℃的U-T曲线.

热电偶具有结构简单,小巧、热容量小、测温范围宽等优点,因此被广泛应用于生产和科学研究的测温和温度的自动控制中.

【实验内容】

1. 实验测定以下温度值下的热电势:

(1) 水的冰点,即0℃,热电偶的热端应放在冰水瓶里;

(2) 室温下水的温度,热电偶的热端放在盛水烧杯里;

(3) 50.0℃左右,热电偶的热端放在恒温水浴的内筒里;

(4) 再分别测出55.0℃、60.0℃、65.0℃、70.0℃、75.0℃的热电势;

(5) 水的沸腾点,热电偶的热端放在沸水(烧杯)里.

2. 实验过程

由于恒温水浴升温费时间,故应在实验开始就接通恒温水浴的电源,并加热.可参考以下步骤:

(1) 接通恒温水浴的电源开关、加热开关和水泵开关,调整电节点温度计,指定升温到50.0℃左右,令其升温.

(2) 将"铜-康铜"热电偶接到毫伏表,热电偶的冷端和热端都放入冰水瓶中.与此同时,应检查冰水瓶内的水面上是否有冰块.如没有冰,应加冰.

(3) 把热电偶的冷端留在冰瓶内,把热端取出放到未加热的盛水烧杯中.用水银温度计(注意用量程为0~50.0℃的)测量水温,然后测量该温度下的热电动势E值.

(4) 取出水银温度计,接通电炉的电源进行加热,待水沸腾后,测量沸水温度下的热电动势U值.

在标准大气压力下,纯水的沸腾温度就是100℃.在非标推大气压下沸水的温度值,可参阅有关资料.

(5) 再把热电偶的热端放在恒温水浴内筒中,分别测量55~75℃各温度点相应的热电动势U值.

(6) 测量完毕要切断仪器内部电源,检查并切断恒温水浴和电炉的电源.

【注意事项】

(1) 水银温度计有两支:量程分别为0~50.0℃和0~100.0℃.测量之前应根据所测的温度范围选用,选用不当会得不出读数或损坏温度计.

水的冰点和沸点都不用温度计测量.

由于玻璃水银温度计容易打碎,使用中应注意保护.

(2) 测量过程中应使热电偶的热端尽量靠近水银温度计的水银泡,以减小水温不均匀引起的误差.

【预习思考】

(1) 何谓热电偶温度计的定标?只选用水的冰点和沸点来定标热电偶是否可行?为什么?

(2) 为什么要将热电偶的冷端置于冰水混合物中?将冷端放在空气中会产生何影响?

(3) 如果测量温度 T 的误差为 ΔT,热电动势 U 误差为 ΔU,那么,在以 E 为纵坐标,T 为横坐标的坐标图上,应如何表示这一对测量结果($U\pm\Delta U,T\pm\Delta T$)?

【习题】

(1) 将测量结果用坐标纸绘制"铜—康铜"热电偶的 U-T 关系曲线.

(2) 测温物质应具有什么样的条件?热电偶符合这个条件吗?

实验 2.11 空气密度的测定

【实验目的】

(1) 了解电光分析天平的结构,学会正确使用.

(2) 了解低真空的获得方法及机械真空泵、气压计、湿度计的使用.

(3) 测定空气密度.

【实验器材】

电光分析天平(或电子分析天平)、物理天平、真空系统、气压计、干湿球湿度计、比重瓶等.

【仪器介绍】

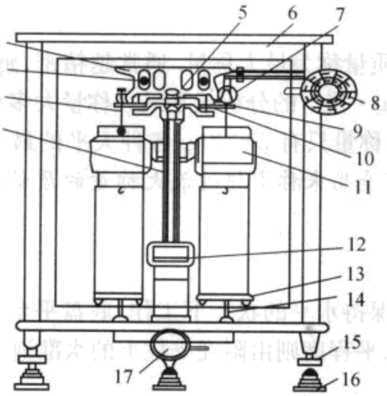
1. TG-328 型光学读数分析天平的结构

1) 分析天平结构

分析天平是精密称衡质量的仪器,在构造、加工和装配上较物理天平更为精密. 如作为支点的刀口(包括刀刃和刀承)是由坚硬耐磨的玛瑙制成,横梁等主要部件一般采用铝合金制成. 使用分析天平时,必须先了解其结构并严格按照操作规则操作.

在图 2.11.1 中横梁 1 有三个玛瑙刀口:中间为支点刀口,两侧为承重刀口. 横梁的两端通过吊耳 3 在支力销 9 上各悬挂一个称盘 13. 吊钩上附有空气阻力器 11,由缝隙很小的内外套组成,可借空气的黏滞性迅速阻止横梁摆动. 天平右上方为加减法码的机械装置,可将几个质量小于 1 克的环形圈码 7 分别加在右盘上面的横梁上,圈码的加减可由外

部旋钮(指数盘)8 进行,圈码调整范围为 10～990mg,1g 以上的砝码要用镊子直接加在右盘上. 10mg 以下的称量则由光学读数装置(投影屏)12 上的平衡指针 4 偏转的格数来表示,在平衡指针的尾端附有一刻度精密的微量标尺(图 2.11.2),其标度通过光学放大投射在屏幕上,每一小格的读数为 0.10mg,它就是天平的感量.



1. 横梁; 2. 平衡螺丝; 3. 吊耳; 4. 指针; 5. 支点刀; 6. 框罩; 7. 环形砝码; 8. 指数盘; 9. 支力销; 10. 折叶; 11. 阻尼内筒; 12. 投影屏; 13. 称盘; 14. 托盘; 15. 螺旋脚; 16. 垫脚; 17. 制动旋钮

图 2.11.1

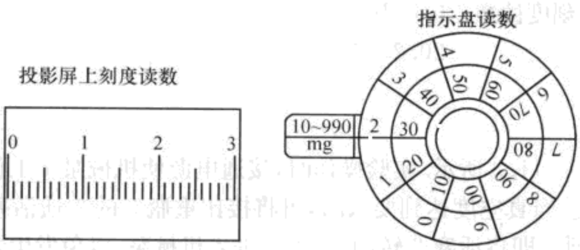


图 2.11.2

玛瑙刀刃虽然耐磨,但因锋利也易于受震而崩裂. 所以,在增减砝码时均需由制动旋钮 17 将天平制动,此时三个刀口的刀刃均与刀承脱离.

2) 主要性能指标

(1) 灵敏度和感量.

当天平两侧的质量相等时,若在右盘加 1mg 砝码,平衡指针将偏转一定的格数 Δe,则天平的灵敏度 S 定义为

$$S = \Delta e \text{ 格} \cdot \text{mg}^{-1}$$

灵敏度的倒数称为天平的感量 L,即

$$L=\frac{1}{S}=\frac{1}{\Delta e}\text{mg}\cdot\text{格}^{-1}$$

例如,在右盘中增加 1mg 砝码,平衡指针偏转 10.0 个小格,则灵敏度 $S=10.0$ 格 · mg^{-1},感量 $L=0.10\text{mg}\cdot$ 格$^{-1}$. 显然,灵敏度越高或感量越小,天平越精密. 本实验中天平的感量为 0.1mg · 格$^{-1}$.

(2) 最大称量.

天平可能称衡的最大质量称为最大称量. 通常越精密、感量越小的天平,其最大称量也越小. 如感量为 0.1～1mg · 格$^{-1}$的分析天平最大称量大多为 100～200g;感量为 0.01～0.03mg · 格$^{-1}$的天平,最大称量只有 2～30g. 各种天平的最大称量总是与它所附砝码的总质量一致的. 分析天平不能用来称衡超过最大称量的质量,否则天平要受损伤. 本天平最大称量为 200g.

3) 水平调整

天平需要在底盘平台保持水平的状态下工作. 底盘平台下面左右两侧的支脚螺丝可以用来调节水平,平台的水平程度则由附在支柱上的水准泡(图 2.11.1 未画出)来指示.

4) 零点调整

在称盘空载时要求光学屏幕上微量标尺的读数为零. 较大的调整,可在天平制动的情况下轻微转动横梁两端的平衡螺丝,较小的调整,可转动设在底盘下面的调零拨杆.

5) 读数方法举例

右盘砝码读数	20.0g
指示盘读数	0.230g
投影屏上刻度读数	0.00160g
质量	20.23160g

2. 真空系统

真空系统如图 2.11.3 所示. 实验操作时,接通电源使机械泵 1 工作,然后转动三通活塞 2,即可开始抽气. 当真空度达到要求时,可将接比重瓶 3 的二通活塞 4 关闭,并切断电源. 切断电源后必须立即将活塞 2 转动,使大气进入机械泵,以免发生泵油倒流.

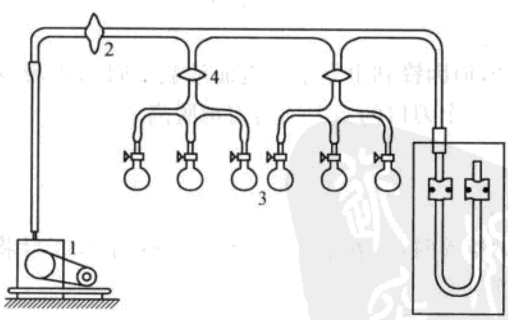


图 2.11.3

【实验原理】

设比重瓶的体积为 V,空气的质量为 M,则空气密度 ρ 为

$$\rho=\frac{M}{V} \tag{2.11.1}$$

若称得比重瓶内处于真空时的质量为 m_1,放入空气后比重瓶的质量为 m_2,则瓶中空气的质量 M 为

$$M=m_2-m_1 \tag{2.11.2}$$

当比重瓶装满水后称得的质量为 m_3,则瓶中水的质量为 m_3-m_1;因为水的密度 ρ_W 已知,故比重瓶的体积 V 应为

$$V=\frac{m_3-m_1}{\rho_W} \tag{2.11.3}$$

将(12.2.2)式及(2.12.3)式代入(2.12.1)式中,则

$$\rho=\frac{M}{V}=\rho_W\frac{m_2-m_1}{m_3-m_1} \tag{2.11.4}$$

在实验中若测得 m_1、m_2、m_3,即可求出空气密度 ρ.

【实验内容】

(1) 将比重瓶清洗、烘干. 在比重瓶真空活塞上涂抹少量真空油脂后接到真空系统中抽空. 当瓶内真空度达到 1mmHg(133.3224Pa)以上时,关闭活塞. 然后取下比重瓶,置于天平上迅速称得 m_1. 注意:实验中真空油脂不要涂得过多,否则油脂外溢,操作过程中可能被擦掉,这样就影响准确称衡,使实验结果产生较大误差.

(2) 称得 m_1 后,缓慢地打开比重瓶的真空活塞,使空气徐徐流入瓶中,待瓶中达到稳定状态后关闭活塞,然后再称得 m_2. 由于密度与温度有关,瓶内充满空气后,手不能直接接触比重瓶体,必须用手拿瓶颈来进行操作.

(3) 将水用注射器注入比重瓶,注入时应避免有气泡产生. 待水超过活塞后,关闭活塞,并用过滤纸将溢出的水吸干,将比重瓶放在物理天平上称得 m_3 的大概质量,然后再用分析天平准确称得 m_3.

在气压计上读取大气压强,然后经过校正得到真实的大气压强,在干湿球温度计上读取干湿温度.

(4) 实验完毕后,先用脱脂棉将比重瓶活塞上的油脂擦掉,再用乙醚擦洗比重瓶,并将乙醇灌入比重瓶内清洗,清洗完毕再放入烘箱,烘干备用.

(5) 由(2.11.4)式算出 ρ 及由(2.11.5)式算出标准状态下的空气密度 ρ_{an}(见附录).

【注意事项】

(1) 称衡前必须先用物理天平预称,称准 1/10g 以上的数值后再用分析天平作精密称衡. 称衡时,待测物放在左盘,1g 以上的砝码放在右盘. 称衡完毕,天平制动,一切复原.

(2) 启动和制动时,应缓慢地转动制动旋钮,最好在光学屏幕的指示接近零点时制动

天平. 以免刀口受损.

(3) 比较待测物与砝码的质量时，只要稍微起动天平便判断谁轻谁重，不必把旋钮旋到底. 这样可以避免当质量相差较大时，平衡指针过度偏转.

(4) 砝码要用镊子取放，不要用手拿，除砝码盒内和右盘外，砝码不能随便放在桌面上.

(5) 被称物及砝码应尽可能放在称盘中央，否则当天平开启时，称盘会动荡. 这样，既不易迅速地观察停点，也易使玛瑙刀口磨损.

(6) 尽量少开启天平的前门，取放砝码及样品时，可以通过左右窗门进行，关闭窗门时务必轻缓.

(7) 要随时保持天平内清洁，不能把湿的或脏的物品放在称盘上，吸湿及腐蚀性物体必须放在密封的容器内称量.

(8) 取放砝码时要轻缓，不能过快转动指示盘旋钮，以免使圈码跳落变位.

【预习思考】

(1) 为什么在用分析天平时，要先用物理天平称量?

(2) 本天平的感量为多少? 它与感量为 0.01mg·格$^{-1}$的天平相比较，哪一个更精密?

(3) 要从"空气的相对湿度与干湿泡温度计温差的关系表"中查到相对湿度百分数，你应该先测出什么量?

【习题】

(1) 标准状态下的干空气密度，它的标准值是 $1.293\times10^{-3}\,\mathrm{g\cdot cm^{-3}}$，试计算测量结果的相对误差.

(2) 比重瓶漏气时测得的 ρ_{an} 与不漏气测得的 ρ_{an}，哪一个大?

【附录】

推导标准状态下干燥空气密度的表达式

$$\rho_{an}=\rho\frac{p_N}{p}\left(\frac{T}{T_0}\right)\left(1+\frac{3}{8}\frac{p_W}{p}\right) \tag{2.11.5}$$

式中，ρ_{an} 为标准状态下的空气密度(0℃和标准状态大气压强下的值)，ρ 为实验测得的大气密度，p_N 为标准状态下的大气压强，p 为实验时的大气压强，T_0 为 273.15K，T 为实验测得的空气温度(用 K 表示)，p_W 为实验条件下，大气所含水蒸气的分压.

实验测得的密度 ρ，是在当时的大气压 p 和温度 t(℃)下得出的，而且是含有水蒸气的混合气体的密度 ρ，即 $\rho=\rho_a+\rho_W$. 其中 ρ_a 是空气密度，ρ_W是水蒸气密度.

我们测量的目标只是其中的 ρ_a(空气密度)，因此要从 $\rho=\rho_a+\rho_W$ 中求出 ρ_a. 为了便于比较，还须将 ρ_a 换算成标准状况(0℃和标准状态下的大气压强)下的值 ρ_{an}. 下面的推导也是两大步：首先从 $\rho=\rho_a+\rho_W$ 中求出 ρ_a，然后由 ρ_a 换算成 ρ_{an}.

因为大气中所含水蒸气密度很小，故可以像对待空气一样，用理想气体状态方程来处理，而且能够达到足够的准确度. 下面我们就把大气看成是由空气和水蒸气组成的混合

气体.

按混合理想气体的计算公式,其各部分的密度为

$$\rho_a = \frac{\mu_a p_a}{RT} \tag{2.11.6}$$

及

$$\rho_W = \frac{\mu_W p_W}{RT} \tag{2.11.7}$$

式中,μ_a 为空气的平均摩尔质量,为 28.8×10^{-3}kg·mol^{-1},μ_W 为水蒸气的摩尔质量,为 18×10^{-3}kg·mol^{-1},p_a 和 p_W 分别为空气和水蒸气的分压强.

由(2.11.7)式和(2.11.6)式得

$$\rho_W = \rho_a \frac{5p_W}{8p_a} \tag{2.11.8}$$

又

$$\rho = \rho_a + \rho_W \tag{2.11.9}$$

将(2.11.8)式代入(2.11.9)式,得

$$\rho_a = \frac{\rho}{1+\dfrac{5p_W}{8p_a}} \tag{2.11.10}$$

ρ_a 是压强为 p_a、温度为 T 时的密度,下面把它换算为标准状态下的密度 ρ_{an}.

设 V_{an} 为标准状态下的空气体积,V_{at} 为温度 T 和压强 p_a 下的体积. 由理想气体状态方程,有

$$\frac{p_a V_{at}}{T} = \frac{p_N V_{an}}{T_0} \tag{2.11.11}$$

温度由 $T\to T_0$ 时,空气的质量恒为 m

$$\frac{p_a V_{at}}{Tm} = \frac{p_N V_{an}}{T_0 m} \tag{2.11.12}$$

而

$$\rho_a = \frac{m}{V_{at}}, \quad \rho_{an} = \frac{m}{V_{an}}$$

故

$$\rho_{an} = \rho_a \frac{p_N}{p_a}\cdot\frac{T}{T_0} \tag{2.11.13}$$

混合气体的压强 p 为各分压强之和

$$p = p_a + p_W$$

即

$$p_a = p - p_W \tag{2.11.14}$$

式中,p 为实验时测得的大气压.

将(2.11.10)式和(2.11.14)式代入(2.11.13)式得

$$\rho_{an} = \frac{\rho}{1+\frac{5p_W}{8p_a}} \cdot \frac{p_N}{p-p_W} \cdot \frac{T}{T_0} \tag{2.11.15}$$

整理得

$$\rho_{an} = \rho \frac{p_N}{p} \cdot \frac{T}{T_0} \frac{1}{\left(1-\frac{p_W}{p}\right)\left(1+\frac{5p_W}{8p_a}\right)} \tag{2.11.16}$$

由于 $p_W \ll p$,所以 $p_a \approx p, \frac{p_W}{p_a} \approx \frac{p_W}{p}$.

(2.11.16)式可写为

$$\rho_{an} = \rho \frac{p_N}{p} \cdot \frac{T}{T_0} \frac{1}{1-\frac{3p_W}{8p}-\frac{5}{8}\left(\frac{p_W}{p}\right)^2} \tag{2.11.17}$$

略去 $\left(\frac{p_W}{p}\right)^2$ 项,并把 $\left(1-\frac{3p_W}{8p}\right)^{-1}$ 级数展开,且只取前两项,得到

$$\rho_{an} = \rho \frac{p_N}{p} \cdot \frac{T}{T_0}\left(1+\frac{3p_W}{8p}\right) \tag{2.11.18}$$

p_W 的求法

$$p_W = \text{相对湿度} \times \text{该温度下饱和蒸汽压}(p'_W)$$

相对湿度和不同温度下饱和蒸汽压(p'_W)查看实验室备用的手册.

实验 2.12　液体黏滞系数的测定

当液体各部分之间有相对运动时,接触面之间有内摩擦力,阻碍液体的相对运动,这种摩擦力称为黏滞力,液体的这种性质称为黏滞性.黏滞力的大小与接触面面积和接触面处的速度梯度成正比,比例系数为液体的黏滞系数.

液体黏滞性在流体力学、化学化工、医疗、水利等领域都有着广泛的应用,如在设计液体输送管道的口径时,就需要根据液体的流量、压力差、输送距离及液体黏滞系数来设计.

【实验目的】

(1) 用斯托克斯法测量液体的黏滞系数.

(2) 熟练地运用基本仪器测量时间、长度和温度.

【实验器材】

落球黏度计、毫秒计、镊子、温度计、米尺、游标尺、小钢球.

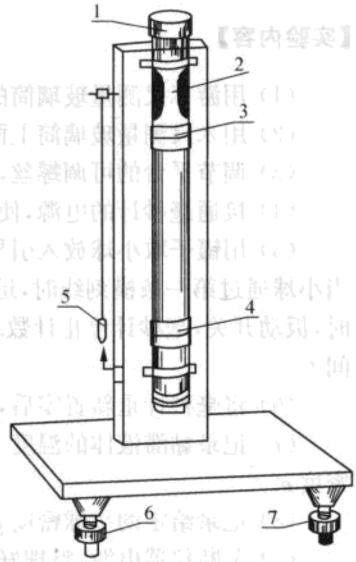
【仪器介绍】

落球黏度计如图 2.12.1 所示.它由玻璃筒、引导管、重锤和可调平台组成.玻璃筒为

盛黏滞液体之用，它与可调平台相互垂直而固定. 围绕筒周有两道水平横线的标记，可以上下移动.

引导管兼作筒盖之用，位于玻璃筒的顶端. 引导管引导小球准确地沿筒的轴线下落，以减小筒壁的影响.

可调平台有两个可调螺丝，位于仪器正面的台板下面，调节螺丝以保证玻璃筒与水平面垂直.



1. 引导管；2. 玻璃筒；3,4. 横刻线；5. 重锤；6,7. 可调螺丝

图 2.12.1

【实验原理】

一个光滑的固体小球，在黏滞液体中下落运动时，受到三个力的作用：重力、浮力和阻力. 阻力是由附在小球上并随小球一起运动的一层液体与相邻液体层之间摩擦引起的，即黏滞阻力. 如果半径为 r 的小球在液体中以速度 v 下落，且下落时的速度很小，小球也极小，同时液体在各个方向上都是无限宽广的，斯托克斯指出，这时的阻力 f 为

$$f = 6\pi\eta vr \tag{2.12.1}$$

式中，η 为液体黏滞系数. η 就是黏滞性的度量，在 SI 制中，η 的单位是 Pa · s，而 1Pa · s=1kg · m^{-1} · s^{-1}. η 与温度有密切的关系，对液体来说，η 随温度的升高而减少，η 可由小球在液体中下落运动的速度来测定.

当小球在液体中下落运动时，三个作用力都在垂直方向. 重力 $(4\pi r^3/3)\rho_0 g$ 向下，浮力 $(4\pi r^3/3)\rho g$ 向上；阻力 f 向上，且 f 随小球速度的增加而增加. 但当小球下落速度达到一定大小时，三力之和为零，于是小球就以匀速下落，即

$$\frac{4\pi r^3}{3}\rho_0 g - \frac{4\pi r^3}{3}\rho g - f = 0 \tag{2.12.2}$$

式中，ρ_0 为小球密度，ρ 为液体密度，$\frac{4\pi r^3}{3}$ 为小球体积. 由(2.12.1)式和(2.12.2)式可得

$$\eta = \frac{2}{9}\frac{(\rho_0 - \rho)gr^3}{v} \tag{2.12.3}$$

(2.12.3)式只有在无限宽广的液体中才适合，而液体放在容器内总不是无限宽广的，如果小球沿内半径为 R 的圆筒下落运动，考虑到器壁的影响，(2.12.3)式需作如下修正：

$$\eta = \frac{2}{9}\frac{(\rho_0 - \rho)gr^3}{v} \cdot \frac{1}{1 + 2.4\frac{r}{R}} \tag{2.12.4}$$

小球下落距离 l 时，下落时间为 t，则

$$\eta = \frac{2(\rho_0 - \rho)gr^3}{9} \cdot \frac{t}{l\left(1 + 2.4\frac{r}{R}\right)} \tag{2.12.5}$$

根据(2.12.5)式即可测定液体的黏滞系数.

【实验内容】

(1) 用游标尺测量玻璃筒的内半径 R，在不同的方向上共测 10 次，取其平均值.

(2) 用米尺测量玻璃筒上两横线间的距离 l，在不同的方向共测 10 次，取其平均值.

(3) 调节平台的可调螺丝，使重锤与标准针尖对准，以保证玻璃筒垂直于水平面.

(4) 接通毫秒计的电源，使其正常工作.

(5) 用镊子取小球放入引导管中，使小球沿筒的轴线下落，从水平方向看准横刻线. 当小球通过第一条横刻线时，迅速扳动开关，毫秒计开始计数；当小球通过第二条横刻线时，扳动开关，毫秒计停止计数. 记录毫秒计的读数，此读数即是小球通过两横刻线间的时间 t.

(6) 将毫秒计重新置零后，按步骤(5)测出 10 粒小球的下落时间 t.

(7) 记录黏滞液体的温度 θ，从温度-密度曲线上查找并记录与黏滞液体温度相应的密度 ρ.

(8) 记录给定的小球密度 ρ_0 和直径 d.

(9) 关断仪器电源，整理好仪器用具，进行数据处理.

【注意事项】

(1) 玻璃筒调垂直后，在整个实验过程中要保持不变，以保证小球沿轴线下落.

(2) 横刻线间的距离 l 应尽量取在玻璃筒的下端，必须保证小球在全部路程上完全做匀速运动.

(3) 小球下落时，液体应是静止的，因此在实验过程中要保持液体处于静止状态，且每下落一小球时要隔一定时间，不能连续放小球.

(4) 实验用的小球要先擦拭干净，不能将灰沙带入液体内，不要将空气带入形成小气泡.

【预习思考】

(1) (2.12.3)式在什么条件下成立？

(2) 小球在黏滞液体中下落的时间为什么不从液面开始计时，而要距离液面一定的距离才开始计时？

(3) 如何判断小球是否做匀速运动？

(4) 观察小球通过横刻线时，如何避免视差？

【习题】

(1) 根据测量数据计算黏滞系数 η.

(2) 假定 η 的随机误差仅由大的测量所引起，试根据 $\eta=\frac{2(\rho_0-\rho)gr^3}{9}\cdot\frac{t}{l\left(1+2.4\frac{r}{R}\right)}$，求 S_η.

实验2.13　测定冰的比熔解热

根据热平衡原理用混合法测定物体间的热交换，是量热学中一种常用的方法，所使用的基本仪器是量热器．本实验用此法测定冰的比熔解热．由于实验过程中量热器不可避免地要与外界进行热交换，故还要求学会能使用将这种热交换因素分离出去的“面积补偿法”，以减小实验误差．

【实验目的】

（1）测定冰的比熔解热．

（2）学习一种修正散热影响的方法．

【实验器材】

量热器、工业天平（或电子天平）、水银温度计（0～50.00℃和0～100.0℃各一支）、量筒、冰、停表等．

【仪器介绍】

本实验使用的主要装置是量热器，其结构如图2.13.1所示，它是由良导体做成的内筒放在一个较大的外筒中组成．通常在内筒中放水、温度计和搅拌器，内筒、水、温度计和搅拌器的热容量可以计算出来．量热器内筒置于绝热架上，外筒又用绝热盖盖上，空气与外界对流很小；内外筒之间有绝热材料，所以内外筒间热传导的热量极少；由于内筒的外壁及外筒的内外壁都电镀得十分光亮，使得它们发射或吸收热辐射的本领变得很小．因此，该实验系统可近似认为是一个孤立系统．

本实验采用的工业天平，最大称量为1000g，感量为0.01g，它的构造如图2.13.2所示．横梁BB′为天平杠杆，O为玛瑙刀口支点，支在玛瑙刀垫上．横梁左右两侧各有玛瑙刀口一个，供支撑吊耳用，吊耳下各挂有一个砝码盘．每套天平的杠杆、吊耳、砝码盘均不能混用，左右也不能乱放．左右两个刀口与中央支点刀口等距，且在同一水平面上．横梁的升

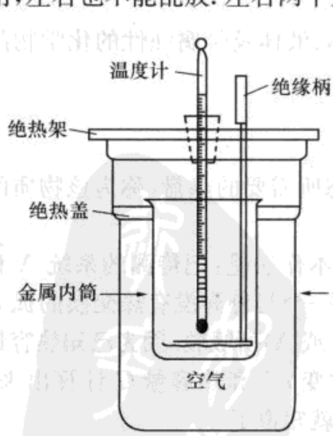


图2.13.1

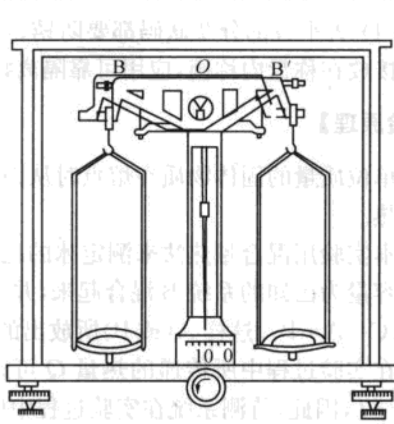


图2.13.2

降由转动手轮控制. 启动时顺时针慢慢地旋转手轮,玛瑙刀垫将横梁杠杆托起,使其灵活地摆动. 制动时也应逆时针缓慢地旋转手轮,使刀垫与刀口脱离开,同时横梁搁在天平架上,而此时杠杆也不承载砝码吊耳及砝码盘. 横梁两端各有一个平衡调节螺母,用于调节空载平衡. 横梁中央下方连有一摆动指针,指针上附有感量砣,用来校正感量,指针用来指示平衡位量. 天平立柱下端固定有标尺,中央 10 位置即为平衡点. 以第 10 格线位于正中,是便于经常进行的取平均值计算.

天平是一种非常灵敏和十分准确的测量仪器,但要真正获得准确度与之相适应的测量,应根据实验要求的最大称量和精密度选用合适的天平,且必须使用方法得当.

1. 天平的使用方法

(1) 水平调整. 天平在使用之前一定要仔细检查底座的水平或立柱的垂直,可分别用底座上水平仪的水泡是否处于正中,或立柱旁的铅垂与准尖是否正对来判断,通过调节底座下的螺丝实现.

(2) 零点调整. 检查天平空载的平衡情况,天平空载支起托架横梁时,指针应在正中 10 左右摆动,左右偏转的格数应一样,如不是,可调节左右的平衡螺母.

(3) 称衡时,一般将待测物体放在左盘,砝码放在右盘,天平只在判断是否平衡期间启动,判断完毕后,当指针摆动经过平衡点时,立即制动.

(4) 天平箱只应在取放物体和砝码等必要物品时才开启两边的门,一般不得随意开启正门. 以免天平受到气流的影响.

2. 天平的操作规则

(1) 天平的称量不得超过最大称量值,以免损坏刀口或压弯杠杆横梁.

(2) 避免刀口受冲击而损坏,在取放任何物体、增减法码、调节平衡螺母及不使用天平时,都必须制动天平,只在判断平衡时启动. 制动应在天平指针经过平衡位置时进行,所有动作要轻.

(3) 砝码不得用手取拿,只准用镊子夹取,从称盘中取出的砝码应立即放回砝码盒原位.

(4) 天平各部分及砝码都要防锈、防腐蚀. 高温物体、液体及带腐蚀性的化学物品不得直接放在称盘内称衡,应用可靠隔离物装载.

【实验原理】

单位质量的固体物质在熔点时从固态全部变成液态所需要的热量,称为该物质的比熔解热.

本实验用混合量热法来测定冰的比熔解热. 它的基本作法是:把待测的系统 A 和一个热容量为已知的系统 B 混合起来,并设法使它们形成一个与外界没有热交换的孤立系统 C(C=A+B). 这样 A(或 B)所放出的热量,全部为 B(或 A)所吸收. 因为已知热容量的系统在实验过程中所传递的热量 Q 可以由其温度的改变 δT 和热容量 C 计算出来,即 $Q=C\delta T$,因此,待测系统在实验过程中所传递的热量也就知道了.

由此可见,保持系统为孤立系统是混合量热法所要求的基本实验条件,这要从实验装

置、测量方法和实验操作等方面去保证. 如果实验过程中系统与外界的热交换不能忽略，就要作散热(或吸热)的修正.

用 M 克 T_1℃的冰与 m 克 T_2℃的水混合，冰的比热容为 c_i，当冰全部溶解为水时，平衡温度为 T_3℃，若量热器内筒和搅拌器的质量分别为 m_1、m_2，其比热容分别为 c_1 和 c_2，在不计温度计的影响且实验系统与外界无热交换的条件下，有

$$ML + Mc_W(T_3 - T_0) + Mc_i(T_0 - T_1) = (mc_W + m_1c_1 + m_2c_2)(T_2 - T_3) \tag{2.13.1}$$

式中，L 为冰的比熔解热，单位为 $\mathrm{cal \cdot g^{-1}}$，$T_0$ 为冰的熔点，取 0℃，c_W 为水的比热容，取 $1\mathrm{cal \cdot g^{-1} \cdot ℃^{-1}}$. 因此，冰的比熔解热 L 为

$$L = \frac{1}{M}(mc_W + m_1c_1 + m_2c_2)(T_2 - T_3) - c_W(T_3 - T_0) - c_i(T_0 - T_1) \tag{2.13.2}$$

实验室条件下，冰的温度 T_1 可认为是 0℃，冰的熔点 T_0 也可认为是 0℃，则

$$L = \frac{1}{M}(mc_W + m_1c_1 + m_2c_2)(T_2 - T_3) - c_WT_3 \tag{2.13.3}$$

混合量热法要求实验系统与周围环境之间没有热交换，这在实验室中很难做到. 因此，在作精密测量时，就需要采用一些办法来求出实验过程中实验系统究竟散失或吸收了多少热量，进而对实验结果进行修正.

本实验中，我们介绍一种根据牛顿冷却定律、用控制系统初温和终温来修正散热影响的方法.

一个系统的温度如果高于环境温度，它就要散失热量. 实验证明，当温度差相当小时(如在 10～15℃里)，散热速度与温度差成正比，此即牛顿冷却定律. 用数学形式表示为

$$\frac{\delta q}{\delta t} = K(T - \theta) \tag{2.13.4}$$

式中，δq 为系统散失的热量，δt 为时间间隔，K 为散热常数，它与系统表面积成正比并随表面的吸收或发射辐射热的本领而变，T、θ 分别为系统及环境的温度，$\frac{\delta q}{\delta t}$ 为散热速率，表示单位时间散失的热量.

根据牛顿冷却定律，当 $T > \theta$ 时，$\frac{\delta q}{\delta t} > 0$，系统向外散热；当 $T < \theta$ 时，$\frac{\delta q}{\delta t} < 0$，系统从环境吸热. 取系统的初温 $T_2 > \theta$，终温 $T_3 < \theta$，以使整个实验过程中系统与环境间的热量传递前后彼此抵消.

实验中的具体情况是：冰块刚投入时，水温高，冰的有效面积大，融化快，因此系统表面温度 T(量热器中水的温)下降较快. 随着冰的不断融化，冰块变小了，水温逐渐降低，冰融化就慢了，水温的降低也就变慢起来. 量热器中水温随时间变化的曲线如图 2.13.3 所示.

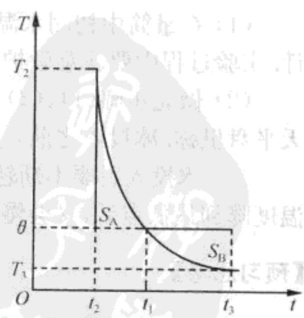


图 2.13.3

根据(2.13.4)式，$\delta q = K(T - \theta)\delta t$，实验过程中，即系统温度从 T_2 变为 T_3 这段时间($t_2 \to t_3$)内系统与环境间交换

的热量为

$$q = \int_{t_2}^{t_3} K(T-\theta)\mathrm{d}t \tag{2.13.5}$$

(2.13.5)式可写成

$$q = K\int_{t_2}^{t_\theta}(T-\theta)\mathrm{d}t + K\int_{t_\theta}^{t_3}(T-\theta)\mathrm{d}t \tag{2.13.6}$$

前一项 $T-\theta>0$，系统散热，后一项 $T-\theta<0$，系统吸热，对应于图中面积

$$S_A = \int_{t_2}^{t_\theta}(T-\theta)\mathrm{d}t,\quad S_B = \int_{t_\theta}^{t_3}(T-\theta)\mathrm{d}t$$

由此可见，S_A 与系统向外散失的热量成正比，即 $q_{散热}=KS_A$；S_B 与系统从外吸收的热量成正比，即 $q_{吸热}=KS_B$. 因此只要使 $S_A \approx S_B$，系统对外的吸热和散热就可相互抵消.

要使 $S_A \approx S_B$，就必须使$(T_2-\theta)>(\theta-T_3)$，究竟 T_2 和 T_3 应取多少，或$(T_2-\theta):(\theta-T_3)$应取多少，要在实验中根据具体情况选定.

【实验内容】

(1) 分别称出量热器内筒和搅拌器的质量 m_1、m_2.

(2) 用量筒取水，将冷水，热水混合，控制水温为室温＋12℃(只用量程为0～100℃的温度计粗测水温即可).

(3) 水温适宜后即可注入量热器内筒，注入的水量取250～260mL，称出内筒、搅拌器和水的质量，此质量减去 m_1、m_2 就是水的质量. 称后把内筒(连同搅拌器)放进量热器外筒. 在量热器的盖子上插有温度计(量程为0～50.0℃)，检查温度计浸入水中深浅是否恰当.

(4) 取适量冰(杂质和气泡较少，色白而坚硬). 轻轻搅拌内筒里的水，记录水的初温 T_2，同时把冰迅速投入内筒，注意不要使水溅出，盖好盖子.

(5) 不断轻轻地搅拌水，观察温度下降情况，记下最低的温度 T_3.

(6) 取出内筒，称其总质量，此质量减去内筒、搅拌器和水三者的质量就是冰的质量 M.

(7) 算出测量结果，根据具体情况决定是否重做. 重做时，根据 $S_A \approx S_B$，选好 T_2 及冰的质量.

【注意事项】

(1) 在量筒中初测水温时不能用0～50.0℃的温度计，以免水温超过量程而损坏温度计. 实验过程中要注意爱护温度计，避免折断，打碎.

(2) 做完步骤(1)、(2)、(3)之后，再取冰，以免取出后放置时间过长，也不能把冰放在天平盘里称. 冰投入之前，应把冰上的水擦干.

(3) 冰投入后要不断轻轻搅动，并仔细观察最低温度，因为环境温度比最低温度高，温度降到最低点后，又会慢慢升高.

【预习思考】

(1) 本实验中的"热学系统"是由哪些部分组成?

(2) 为使系统的散热减少，量热器的内筒用杜瓦瓶来做好不好？

(3) 在什么时候测量系统的初温 T_2 最好？T_2 选得太高、太低有什么不好？

(4) 系统的终温 T_3 是由什么决定的？

(5) 测量温度时为什么要用搅拌器不断地轻轻搅拌？

【习题】

(1) 混合量热法要求保证什么实验条件？

(2) 根据测量数据计算冰的熔解热.

(3) 根据本实验装置及操作的具体情况分析误差产生的主要因素有哪些？

实验 2.14　用拉脱法测液体的表面张力系数

液体沿表面总是存在着使液面紧张且向液体内收缩的力，称为表面张力. 液体的许多现象，如毛细管现象、湿润现象、泡沫的形成等，都与表面张力有关. 表面张力系数是液体表面的重要力学性质：对于不同种类的液体，其表面张力系数不同；而对于同一种液体，其表面张力系数随着温度及其所含杂质的改变而增大或减小. 这些性质广泛应用于工业生产中，如浮法选矿、液体的传输技术、化工生产线的设计等都要对液体的表面张力进行研究.

测定液体表面张力系数的方法很多. 常用的有拉脱法和毛细管升高法. 本实验介绍用拉脱法测定液体表面张力系数.

【实验目的】

(1) 测水和肥皂水的表面张力系数.

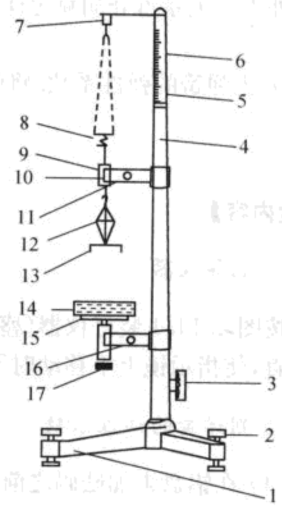
(2) 测弹簧的弹性系数.

【实验器材】

焦利氏秤、游标卡尺、酒精灯、温度计、镊子、玻璃皿.

【仪器介绍】

焦利氏秤如图 2.14.1 所示. 在装有水平调节螺丝 2 的三脚座 1 上，竖直装有套筒 4，套筒顶端有一个"十分游标"，套筒内是刻有毫米度尺的铜管 6，旋转手轮 3 可以使铜管在套筒中升降. 螺钉 7 供固定弹簧 8 之用，弹簧下挂有指示镜 9，指示镜下挂有铝盘 12 和"⊓"形金属丝 13，夹子 11 夹持指示管 10，夹子 16 夹持平台 15. 平台的升降由旋钮 17 调节，平台上放有盛水的玻璃皿 14. 此外，还配有砝码盒.



1. 三脚座；2. 整平螺丝；3. 手轮；4. 套筒；5. 游标；6. 铜管尺；7. 固定螺钉；8. 弹簧；9. 指示镜；10. 指示管；11. 夹子；12. 铝盘；13. "⊓"形金属丝；14. 盛水玻璃皿；15. 平台；16. 夹子；17. 升降旋钮

图 2.14.1

【实验原理】

液体表面都有尽量缩小的趋势，这是由于液体存在着沿表面切线方向作用的表面张力. 表面张力的大小可以用表面张力系数 α 来描述. 设想在液面上取一长为 l 的线段，则张力的作用表现在线段两边的液面以一定的拉力 f 相互作用，而且力的方向恒与线段垂直，大小与线段长度 l 成正比，即

$$f = \alpha l \tag{2.14.1}$$

比例系数 α 就是液体表面张力系数，它表示单位长度直线两边液面的相互拉力.

表面张力系数 α 与液体的种类、温度和杂质有关. 对于某液体，只要测 f 和 l，便可算出该温度下的 α 值. 如果采用国际单位制，则 α 的单位是牛/米($N \cdot m^{-1}$).

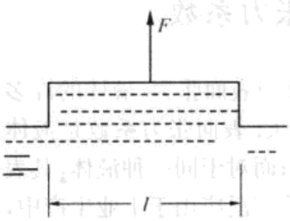


图 2.14.2

本实验是用一"冂"形金属丝浸入液体，然后从液面拉起一张薄膜(图 2.14.2)，由于薄膜前后有两个表面，故所受的拉力 F 为(此处未考虑重力)

$$F = 2f = 2\alpha l \tag{2.14.2}$$

$$\alpha = \frac{F}{2l} \tag{2.14.3}$$

由(2.14.3)式可知，如果测得 F 和 l，就可以计算出表面张力系数 α. 实验中用焦利氏秤来测力 F，用游标卡尺来测长度 l.

焦利氏秤是根据弹簧的伸长量 ΔL 量度力 F 的大小的，因为在弹性限度内，弹簧的伸长与外力的关系遵守胡克定律，即弹簧的伸长 ΔL 与外力 F 成正比

$$F = k\Delta L \tag{2.14.4}$$

式中，k 为弹簧的弹性系数. 将(2.14.4)式代入(2.14.3)式，有

$$\alpha = \frac{k\Delta L}{2l} \tag{2.14.5}$$

【实验内容】

1. 准备仪器

按图 2.14.1 装好仪器(盛水玻璃皿暂不要放上去)，调节三脚座上的整平螺丝，使套筒铅直，使指示镜上下移动时不与指示管壁相碰.

2. 测弹簧的弹性系数

(1) 在铝盘未加砝码之前，转动手轮和移动夹子 11，使指示管和指示镜上的刻度线对准(一经对准，不得再移动指示管的位置). 用焦利氏秤上端的游标读出铜管尺上的数值并记录.

(2) 在铝盘中加 100mg 砝码，慢慢转动手轮，再使指示管和指示镜上的刻度线对准(应在弹簧停止振动时观察)，再读数并记录之.

(3) 在铝盘中加 100mg 砝码，重复步骤 2(2). 如此下去，每次增加 100mg 砝码，直到

所加砝码共 900mg 为止. 然后每次减少砝玛 100mg,到零为止.

(4) 用逐差法计算,或是用作图法求出弹性系数(这一步可以在课后完成).

3. 测水的表面张力

(1) 用镊子夹棉花少许,蘸碱液擦玻璃皿,然后用清水冲洗干净,再盛去离子水,放置在平台上.

(2) 用镊子夹住"⌐¬"形金属丝在酒精灯上烧到呈暗红色,以去油污,然后放在酒精中轻轻擦洗干净.

(3) 将"⌐¬"形金属丝挂在铝盘下(不能用手拿,要用镊子夹). 转动手轮使指示镜和指示管上的刻度线对准(一经对准,再不得移动指示管),读数并记录之(设此读数为 L_0).

(4) 旋转旋钮,使平台上升,把"⌐¬"形金属丝浸没于水中,然后再使平台下降,当"⌐¬"形金属丝受到液膜张力的作用时,必须用左手操纵平台缓缓下降,右手转动手轮,使弹簧上升,以随时保持指示镜与指示管上的刻线对准,直到水膜刚被拉破为止,读数并记录之(设此读数为 L).

弹簧的伸长 $\Delta L=L-L_0$,测量 ΔL 共 5 次,取平均值.

(5) 测量水温,用游标尺测量"⌐¬"形金属丝的宽度 l.

4. 测肥皂水的表面张力

参照步骤 3.

【注意事项】

(1) 清洗后的玻璃皿和"⌐¬"形金属丝不得再用手触及,将"⌐¬"形金属丝烧红、清洗都必须用镊子进行,洗净后应立即用镊子挂到铝盘下.

(2) 注意保持"⌐¬"形金属丝的平直,不得弯曲、变形.

(3) 测表面张力时,操作应平稳、缓慢,不可在振动的情况下测量.

【预习思考】

(1) 将"按测水的表面张力的步骤 3 来确定弹簧伸长的初值 L_0"与"把"⌐¬"形金属丝框放在水中来确定初值 L_0"这两种情况相比较,弹簧受力有何区别? 用哪种方法确定初值好些? 为什么?

(2) 试分析"⌐¬"形金属丝框从水中拉起的过程中弹簧受力的变化情况. 然后再想一想,为什么要把破膜时弹簧受的力作为(2.14.2)式中的 F?

(3) 如果金属丝框是不规则的形状,如"⌐♀¬",测量时应如何确定公式 $\alpha=\dfrac{k\Delta L}{2l}$ 中的 l 值?

【习题】

(1) 用逐差法计算弹簧的弹性系数 k,并计算实验温度下水的表面张力系数.

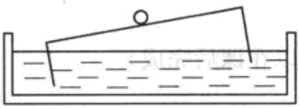


图 2.14.3

(2) 如图 2.14.3 所示,"⊓"形框从水中拉出时不是水平的,但实验者并未发现,他仍然用公式 $\alpha=\frac{k\Delta L}{2l}$ 来计算,请问他错在哪里?

实验 2.15　金属线膨胀系数的测量

绝大多数物质都具有"热胀冷缩"的特性,这是由于物体内部分子热运动加剧或减弱造成的.这个性质在工程结构的设计中、在机械和仪器的制造中、在材料的加工(如焊接)中,都应考虑到,否则,将影响结构的稳定性和仪表的精度.考虑失当,甚至会造成工程的损毁、仪器的失灵以及加工焊接中的缺陷和失败等.

【实验目的】

学习测量金属线膨胀系数的一种方法.

【实验器材】

金属线膨胀系数测量实验装置(图 2.15.1)、YJ-RZ-4A 数字智能化热学综合实验仪(图 2.15.2).

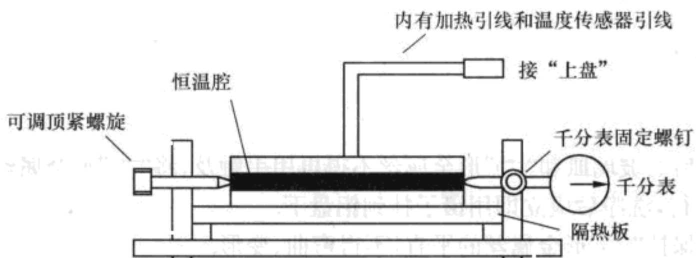


图 2.15.1

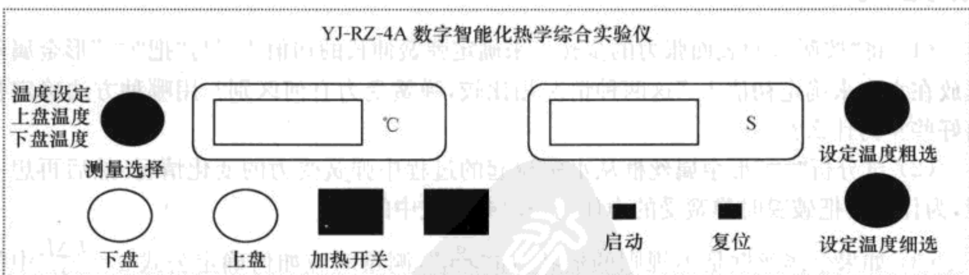


图 2.15.2

【实验原理】

固体受热后其长度的增加称为线膨胀.经验表明,在一定的温度范围内,原长为 L 的

物体，受热后其伸长量 ΔL 与其温度的增加量 Δt 近似成正比，与原长 L 也成正比，即

$$\Delta L = \alpha L \Delta t \tag{2.15.1}$$

式中，比例系数 α 称为固体的线膨胀系数(简称线胀系数). 大量实验表明，不同材料的线胀系数不同(表 2.15.1)，塑料的线胀系数最大，金属次之，殷钢、熔融石英的线胀系数很小. 殷钢和石英的这一特性在精密仪器测量中有较多的应用.

表 2.15.1 几种材料的线胀系数

材 料	铜、铁、铝	普通玻璃、陶瓷	殷 钢	熔凝石英
α 数量级	$\sim10^{-5}/℃^{-1}$	$\sim10^{-6}/℃^{-1}$	$<2\times10^{-6}/℃^{-1}$	$10^{-7}/℃^{-1}$

实验还发现，同一材料在不同温度区域，其线胀系数不一定相同. 某些合金，在金相组织发生变化的温度附近，同时会出现线胀量的突变. 因此测定线胀系数也是了解材料特性的一种手段. 但是，在温度变化不大的范围内，线胀系数仍可认为是一常量.

为测量线胀系数，我们将材料做成条状或杆状. 由(2.15.1)式可知，测量出 t_1 时杆长 L、受热后温度到达 t_2 时的伸长量 ΔL，则该材料在(t_1, t_2)温区的线胀系数为

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L(t_2 - t_1)} \tag{2.15.2}$$

其物理意义是固体材料在(t_1, t_2)温区内，温度每升高一度时材料的相对伸长量，单位为$℃^{-1}$.

测线胀系数的主要问题是如何测伸长量 ΔL. 先粗估算出 ΔL 的大小，若 $L\approx250$mm，温度变化 $t_2 - t_1\approx100℃$，金属的 α 数量级为 $10^{-5}℃^{-1}$，则可估算出 $\Delta L\approx0.25$mm. 对于这么微小的伸长量，用普通量具如钢尺或游标卡尺是测不准的. 可采用千分表(分度值为 0.001mm)、读数显微镜、光杆干放大法、光学干涉法等进行测量. 本实验中采用千分表测微小的线胀量.

【实验内容】

1. 开机

(1) 如图 2.15.1、图 2.15.2 所示，卸下三个下盘支撑螺钉，安装好实验装置，连接好电缆线，打开电源开关，"测量选择"开关旋至"设定温度"挡，调节"设定温度粗选"和"设定温度细选"钮，选择设定加热盘为所需的温度(如 50.0℃)值.

(2) 将"测量选择"开关拨向"上盘温度"挡，打开加热开关，观察加热盘温度的变化，直至加热盘温度恒定在设定温度(50.0℃).

2. 测量

当加热盘温度恒定在设定温度 50.0℃，读出千分表数值 L_1，当温度分别为 55.0℃、60.0℃、65.0℃、70.0℃、75.0℃、80.0℃、85.0℃、90.0℃、95.0℃时，分别记下千分表读数 L_2、L_3、L_4、L_5、L_6、L_7、L_8、L_9、L_{10}. 将实验数据记录在表 2.15.2 中.

3. 计算

用逐差法求出温度改变 5℃时金属棒的平均伸长量，由(2.15.2)式即可求出金属棒

在(50℃,95℃)温区内的线胀系数.

表 2.15.2 线胀系数测量数据表

T/℃	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
L/mm										
ΔL/mm										
$\alpha=\frac{\Delta L}{L(t_2-t_1)}$										

【注意事项】

(1) 千分表安装时应适当固定(以表头无转动为准)且与被测物体有良好的接触(读数在 0.2～0.3mm 处较为适宜);

(2) 因伸长量极小,故仪器不应有振动;

(3) 千分表测头需与实验样品保持在同一直线上.

【习题】

(1) 该实验的误差来源主要有哪些?

(2) 如何利用逐差法来处理数据?

(3) 利用千分表读数时应注意哪些问题,如何消除误差?

第3章 电磁学实验

3.0 电磁学实验基本知识

3.0.1 电磁学实验的目的要求

电磁学实验是物理实验课程中系统学习电磁基本特性和进行电磁基本测量的一个重要组成部分，其中电学实验的测量方法，不仅电磁学物理量测量要用到，而且力学、热学、光学等物理量的测量，有时也要用到. 一些非电学量常常通过各种传感器转化为电学量，用电学实验方法进行测量，所以电学实验在整个物理实验中占有重要地位. 通过电磁学实验的学习，学生应达到以下几点基本要求：

(1) 了解交流市电的性能，懂得避免人触电和防止仪器损坏的道理，养成科学从事电的操作的习惯.

(2) 能准确地接好电磁学实验电路，并能用万用表查明电路故障.

(3) 会使用三个调节器（分压器、控流器和调压变压器）.

(4) 懂得三类仪器（电源、电阻、电表）的性能和使用方法；会使用四种衡器（标准电池、标准电阻、标准电感器、标准电容器）；学会按照说明书使用信号发生器、通用示波器、模拟数字万用表等仪器.

(5) 掌握五种基本测量方法（伏安法、电桥法、补偿法、谐振法、示波法）的原理和操作方法，以及具体实验的设计思想.

(6) 会用有效数字读数和计算，能用计算机处理数据，并能分析实验结果的不确定度.

(7) 学习分析引起测量误差的因素，力求以"最佳态"做实验.

3.0.2 实验的安全问题

实验的首要问题是保证实验的安全，即保证实验者不触电和仪器不受损坏.

1. 避免人触电的总原则

既要操作电，又要绝对避免触电，其总原则是：采取有效绝缘措施，杜绝所有引起触电的可能因素，使操作者身上流过的电流远小于0.6mA. 比如，对220V交流市电电路，能关断电源进行检修的，则一定要关断电源后再检修；万不得已要带电检修的，则必须采取有效措施，使人与电绝缘、人与"地"绝缘.

在一般情况下，电压可分成三种情况对待：

(1) 当电压<36V时，手触摸电，一般不会有触电感觉，即使在潮湿的环境下有触电

的感觉也不会有生命危险，故 36V 以下电压称为安全电压.

(2) 当电压高于安全电压而在 380V 以下时(实验室的交流市电：单相 220V，三相 380V)，必须按照上述避免触电的原则处理.

(3) 当电压高至上千伏时，绝对不能再简单地用绝缘措施去直接操作，而必须按专门的措施和规则工作，否则很容易发生触电，造成生命危险. 万伏以上的电压，人靠近时都有可能引起“电击”.

2. 防止电损坏仪器的原则

电磁学实验室里发生电损坏仪器事故，归根结底有两种类型：

(1) 不懂得或不注意仪器(器具)的额定电压、额定电流和额定功率. 使用仪器时，误用在超过其额定值的情况下，因而仪器被损坏甚至烧毁. 例如，误把其交流电压为 110V 的仪器接插到 220V 电源上.

(2) 有时尽管注意到用电仪器的额定值，但因连接的电路有误，接通电源时仪器便被损坏甚至烧毁. 例如，误把万用表的安培挡当作伏特表使用，从而导致指针被撞断甚至表内线圈被烧.

要防止电损坏仪器，必须懂得引起仪器损坏的原因，严格按安全规程进行实验.

3. 安全操作的几点规则

从历来的经验教训中，我们总结出以下几点主要安全操作规则：

(1) 接电路时，一定要等到最后才将电源与电路相连接；拆电路时，一定要先把电源从电路上拆开.

(2) 实验中改换电路或仪器时，必须先拆开或关断电源.

(3) 对可调电压电路，一般采取“边逐步升压边观察”、“一有意外立即断电”的方法，使电路和仪器处于安全工作状态.

(4) 对 36V 以上至数百伏以内的电源电路或仪器，操作者要有可靠的绝缘措施，并养成每次只操作电路中一个点的习惯.

(5) 万一发生触电或损坏仪器事故，不要惊慌失措，应立即关断电源，查找原因.

由以上讨论可知，对待电既要不怕，又不能盲目地轻视，即应该在科学的基础上把怕转化为不怕. 只有这样，才能大胆而安全地做好电磁学实验.

3.0.3　电源及其使用规则

电源是供给电能的设备，分交、直流两种. 实验用的交流电源是市电(50Hz，220V)或是经变压器变压的交流电. 直流电源则多用直流稳压电源或干电池. 电源的性能有四个主要指标：

(1) 额定电压——电源维持正常工作时所能输出的最高电压.

(2) 额定电流——电源维持正常工作时所能输出的最大电流.

(3) 输出阻抗(对电池来说就是内阻)——对稳压电源来说，其值越小越好.

(4) 稳定性——电源端电压的稳定程度.

这些性能指标是选择电源的主要依据.

如果负载电路和电源不相适配,电源会击穿烧坏负载或电源自身被烧坏. 为避免这类事故,使用电源时必须遵守三条基本规则:

(1) 电源和负载电路连接时, 必须估算它们各自的电流、电压,以确保它们都小于其额定值.

(2) 绝对不能使电源两极短路.

(3) 使用电源时,电路检查无误后才能通电;使用结束后,应该先拆除电源,再拆电路.

3.0.4 电表的使用知识

电表是电磁学实验中的最基本的仪器之一,下面就使用电表时要注意的问题简述如下.

1. 电表的符号

1) 电表的类型——表示电表的结构、工作原理

下面列出一些典型的形式:

 磁电式　　 磁屏蔽电动式

 电磁式　　 磁电整流式

 电动式　　 热电式

 电子管式　　 感应式

2) 电表的用途

Ⓥ——伏特计,测电压用.

Ⓐ——安培计,测电流用.

Ⓦ——瓦特计,测功率用.

3) 被测电流的种类——表示电表能测的是哪种电流

符号	种类	符号	种类
—	直流	～	交流
≃	交直流	≋	三相电流

4) 电表的量程

它是当表针偏转至最大刻度处(满刻度处)时,电表所量出的值. 换句话说,电表的量程就是电表(在用该量程挡时)所能量的最大值.

5) 级别——表示电表的测量准确度

$(\overline{0.1})$0.1 级　　$(\overline{0.2})$0.2 级　　$(\overline{0.5})$0.5 级

$(\overline{1.0})$1.0 级　　$(\overline{1.5})$1.5 级　　$(\overline{2.5})$2.5 级

$(\overline{5.0})$5.0 级

6）方位——表示电表应按什么方位放置使用

↑ 或 ⊥	垂直放置
→ 或 ⌐	水平放置
∠ 60°	倾斜 60 度放置

7）其他符号

2kV	表示绝缘耐压为 2000V
△B	表示可以在 B 类条件下使用. B 类条件是：温度范围从－20℃到＋50℃ 相对湿度低于 80％
Ⅲ	防御周围磁场影响的等级为Ⅲ级

2. 电表的选用要点

1）选择要点

（1）根据欲测量的性能选电表的类型.

（2）根据欲测量的数值选电表的量程.

（3）根据测量的精确度要求选电表的级别.

例如，要测量的量是 50Hz 正弦交流电压，其值约为 100V，测量精确度要求 1％，这样就应选能测这种电压的电表——电磁式或电动势伏特计，电表的量程为 150V 左右，其级别为 0.5 级.

2）使用要点

（1）注意选取量程.

在不太了解被测电学量的值以前，应该用最大的量程挡测试；当测出了大约值以后，应选用稍大于待测值的那个量程挡精确测量.

（2）连线要正确.

安培计应与待测电路串联；伏特计应与待测电路并联；直流电表应注意正负极；部分交流表应注意“共地”问题.

（3）按电表的规定方位放置电表.

（4）检查、调整机械零点.

（5）读数时应避免斜视差.

3. 电表的级别、读数和测量值的误差

1）电表的级别

电表按准确度由高到低共分为七级，即 0.1，0.2，0.5，1.0，1.5，2.5，5.0 级.

电表的级别值 γ 如此确定：它略大于（或等于）刻度值中基本误差最大的那个值的绝对误差与测量值的百分比值，即

$$\gamma\% \geqslant \left|\frac{(\Delta N)_{\max}}{N_{\max}}\right|$$

例如，凡是 $\gamma=1.0\%$ 的电表，即 0.1 级的电表，其刻度值中最大的基本误差为 0.5%～1.0%范围内的某个值. 而刻度值中最大基本误差为 0.21%～0.50%范围内某个值的电表，其级别是 0.5 级.

电表的基本误差是由电表本身的结构质量决定的. 它是在所规定的一系列周围环境和使用条件下测定出来的. 如果电表不是在所规定的条件下使用，还会产生所谓的附加误差.

2）电表的读数方法

现举例说明. 设有一个直流毫安计，它的读数刻度共有 150 个小分格，它有 1.5mA 和 7.5mA 两个量程. 现先后用这两个量程去测量同一个稳定的电流值，测时其指针偏转情况如图 3.0.1 所示，应如何读数？

(1) 当用 1.5mA 挡时，其指针偏在 1.00～1.01mA 的分格内(图 3.0.2)，且估计处在该分格的 4/5 的位置(应垂直于刻度盘观察，以消除视差)，因此读数为

$$I=1.00+\frac{1.5}{150}\times\frac{4}{5}=1.008(\text{mA})$$

(2) 当用 7.5mA 挡时，其指针偏在 1.00～1.05mA 的分格内(图 3.0.3)，且估计处在该分格的 1/5 的位置，因此读数为

$$I=1.00+\frac{7.5}{150}\times\frac{1}{5}=1.01(\text{mA})$$

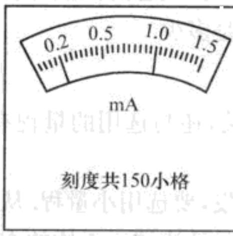


图 3.0.1



图 3.0.2

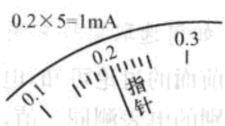


图 3.0.3

3）电表的误差

(1) 测量误差.

电表测量产生的误差主要有两类：

仪器误差 由电表结构和制作上的不完善所引起. 例如，轴承摩擦、分度不准、刻度尺划的不精密、游丝的变质等原因的影响，使得电表的指示与其值有误差.

附加误差 这是由于外界因素的变动对仪表读数产生影响而造成的. 外界因素指的是温度、电场、磁场等.

当电表在正常情况下(符合仪表说明书上所要求的工作条件)运用时，不会有附加误差，因而测量可只考虑仪器误差.

(2) 电表的测量误差与电表等级的关系.

各种电表根据仪器误差的大小共分为七个等级，即 0.1，0.2，0.5，1.0，1.5，2.5，5.0.

根据仪表的级数可以确定电表的测量误差. 例如,0.5 级的电表表明其相对额定误差为 0.5%. 它们之间的关系可表示如下:

$$相对额定误差 = \frac{绝对误差}{表的量程}$$

$$仪器误差 = 量程 \times 仪表等级\%$$

例如,用量程为 15V 的伏特表测量时,表上指针的示数为 7.28V,若表的等级为 0.5 级,读数结果应如何表示?

$$\begin{aligned}仪器误差\ \Delta U_{仪} &= 量程 \times 表的等级\ \% = 15 \times 0.5\% \\ &= 7.5\% = 0.08(\mathrm{V})(误差取一位)\end{aligned}$$

$$相对误差 \frac{\Delta U}{U} = \frac{0.08}{7.28} = 1\%$$

由于用镜面读数较准确,可忽略读数误差,因此绝对误差只取仪器误差. 读数结果为 $U=(7.28\pm0.08)\mathrm{V}$

(3) 根据电表的仪器误差(B类不确定度)确定有效数字.

例如,用量程为 15 伏,0.5 级的伏特表测量电压时,应读几位有效数字?

根据电表的等级数和所用量程可求出

$$\Delta U = 15 \times 0.5\% = 0.08(\mathrm{V})$$

故读数时只需读到小数点后两位,以下位数的数值按有效数字的舍入规则处理.

用有效数字记录的测量值,只能表明它的最后一位是欠准的(从总的位数可表明该量的测量大致准确度),但不能表示出最后一位不准的确切范围是多少.

4) 如何选取量程来测量

由前面的讨论可知,电表的仪器误差不仅与表的级别有关,还与选用的量程有关,用相同级别的电表测同一值,用小量程测时其测量误差较小.

从避免电表损坏出发,要选用大量程;从减小测量误差出发,要选用小量程. 从表面上看两者是矛盾的,电表的使用要点(1)所阐明的步骤(前面)就是解决这一矛盾的方法.

3.0.5 电磁学实验常用仪器

1. 灵敏电流计

灵敏电流计的特征是指针零点在刻度中央,便于检测不同方向的直流电. 灵敏电流计常用在电桥和电位差计的电路中作平衡指示器,即检测电路中有无电流,故又称检流计.

检流计的主要规格是:

(1) 电流计常数. 即偏转一小格代表的电流值. AC-5/2 型的指针检流计一般为 $10^{-6}\mathrm{A}\cdot格^{-1}$.

(2) 内阻. AC-5/2 型检流计内阻一般不大于 50Ω.

2. 直流电压表

直流电压表是用来测量直流电路中两点之间电压的. 根据电压大小的不同,可分为毫

伏表(mV)和伏特表(V)等. 电压表是由表头串联一个适当大的降压电阻而构成的,如图 3.0.4 所示,它的主要规格是:

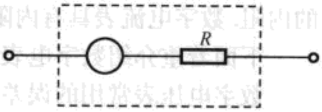


图 3.0.4

(1) 量程. 即指针偏转满度时的电压值. 例如,伏特表量程为 0—7.5V—15V—30V,表示该表有三个量程,第一个量程在加上 7.5V 电压时偏转满度,第二、三个量程在加上 15V、30V 电压时偏转满度.

(2) 内阻. 即电表两端的电阻,同一伏特表不同量程内阻不同. 例如,0—7.5V—15V—30V 伏特表,它的三个量程内阻分别为 1500Ω,3000Ω,6000Ω,但因为各量程的每伏欧姆数都是 200Ω · V^{-1},所以伏特表内阻一般用 Ω · V^{-1}统一表示,可用下式计算某量程的内阻.

$$内阻=量程\times每伏欧姆数$$

3. 直流电流表

直流电流表是用来测量直流电路的电流的. 根据电流大小的不同,可分为安培表(A)、毫安表(mA)和微安表(μA),电流表是在表头的两端并联一个适当的分流电阻而构成的,如图 3.0.5 所示. 它的主要规格是:

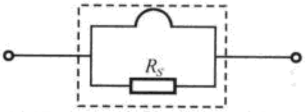


图 3.0.5

(1) 量程:即指针偏转满度时的电流值,安培表和毫安表一般都是多量程的.

(2) 内阻:一般安培表的内阻在 0.1Ω 以下. 毫安表、微安表的内阻分别为 100~200Ω 和 1000~2000Ω.

使用直流电流表和电压表应注意:

(1) 电表的连接及正负极. 直流电流表应串联在待测电路中,并且必须使电流从电流表的"+"极流入,"−"极流出. 直流电压表应并联在待测电路中,并应使电压表的"+"极接高电位端,"−"极接低电位端.

(2) 电表的零点调节. 使用电表之前,应先检查电表的指针是否指零,如不指零,应小心调节电表面板上的零点调节螺丝,使指针指零.

(3) 电表的量程. 实验时应根据被测电流或电压的大小,选择合适的量程. 如果量程选得太大,则指针偏转太小,会使测量误差太大. 量程选得太小,则过大的电流或电压会使电表损坏. 在不知道测量值范围的情况下,应先试用最大量程,根据指针偏转的情况再改用合适的量程.

(4) 视差问题. 读数时应使视线垂直于电表的刻度盘,以免产生视差. 级别较高的电表,在刻度线旁边装有平面反射镜. 读数时,应使指针和它在平面镜中的像相重合.

4. 数字电表

数字电表是一种新型的电测仪表,在测量原理、仪器结构和操作方法上都与指针式电表不同,数字电表具有准确度高、灵敏度高、测量速度快的优点.

数字电压表和电流表的主要规格是:量程、内阻和精确度. 数字电压表内阻很高,一般在 MΩ 以上,要注意的是其内阻不能用统一的每伏欧姆数表示,说明书上会标明各量程

的内阻.数字电流表具有内阻低的特点.

下面着重介绍数字电表的误差表示方法以及在测量时如何选用数字电表的量程.

数字电压表常用的误差表示方法是

$$\Delta = \pm (A\% U_x + b\% U_m)$$

式中,Δ 为绝对误差值,U_x 为测量指示值,U_m 为满度值,A 为误差的相对项系数,b 为误差的固定项系数.

从上式可以看出,数字电压表的绝对误差分为两部分:式中第一项为可变误差部分;式中第二项为固定误差部分,与被测值无关.

由上式还可得到测量值的相对误差 r 为

$$r = \frac{\Delta}{U_x} = \pm \left(a\% + b\% \frac{U_m}{U_x} \right)$$

此式说明满量程时 r 最小,随着 U_x 的减小 r 逐渐增大,当 U_x 略大于 $0.1U_m$ 时,r 最大.当 $U_x \leqslant 0.1U_m$ 时,应该换下一个量程使用,这是因为数字电压表量程是 10 进位的.

例如,一个数字电压表在 2.0000V 量程时,若 $A=0.02$,$b=0.01$,其绝对误差为

$$\Delta = \pm (0.02\% U_x + 0.01\% U_m)$$

当 $U_x = 0.1U_m = 0.2000\text{V}$ 时相对误差为

$$r = \pm (0.02\% + 10 \times 0.01\%) = \pm 0.12\%$$

而满度时 r 值只有 $\pm 0.03\%$.所以,在使用数字电压表时,应选合适的量程,使其略大于被测量,以减小测量值的相对误差.

5. 电阻器

实验室常用的电阻除了有固定阻值的定值电阻以外,还有电阻值可变的电阻器,主要有电阻箱和滑线变阻器.

1) 电阻箱

电阻箱外形如图 3.0.6(a)所示,它的内部有一套用锰铜线绕成的标准电阻,按图 3.0.6(b)连接.旋转电阻箱上的旋钮,可以得到不同的电阻值.在图 3.0.6(a)中,每个旋钮的边缘都标有数字 0,1,2,…,9,各旋钮下方的面板上刻×0.1,×1,×10,…,×10000 的字样,称为倍率.当每个旋钮上的数字旋到对准其所示倍率时,用倍率乘以旋钮上的数值并相加,即为实际使用的电阻值.如图 3.0.6 所示的电阻值为

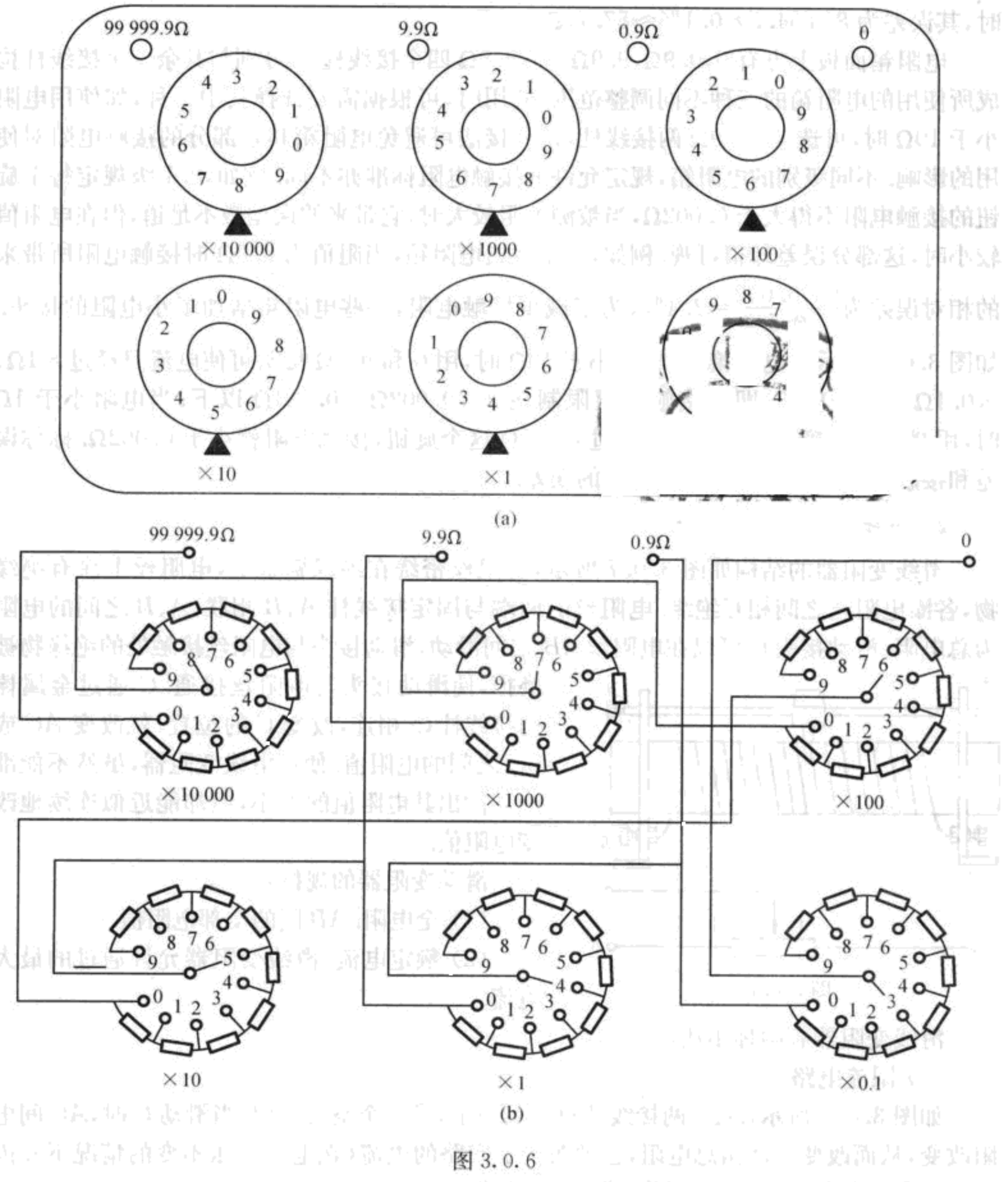
$$R = 8 \times 10000 + 7 \times 1000 + 6 \times 100 + 5 \times 10 + 4 \times 1 + 3 \times 0.1 = 87654.3(\Omega)$$

电阻箱的规格是

(1) 总电阻.即最大电阻,如图 3.0.6 所示的电阻箱总电阻为 99999.9Ω.

(2) 额定功率.指电阻箱每个电阻的功率额定值,一般电阻箱的额定功率为 0.25W,可以由它计算额定电流.例如,用 100Ω 挡的电阻时,允许的电流为

$$I = \sqrt{\frac{W}{R}} = \sqrt{\frac{0.25}{100}} = 0.05\text{A}$$



(a)

(b)

图 3.0.6

各挡容许通过的电流值，如表 3.0.1.

表 3.0.1

旋钮倍率	×0.1	×1	×10	×100	×1000	×10 000
容许负载电流/A	1.5	0.5	0.15	0.05	0.015	0.005

(3) 电阻箱的等级. 电阻箱根据其误差的大小分为若干个准确等级，一般分为 0.02，0.05，0.1，0.2 等，它表示电阻值相对误差的百分数. 例如，0.1 级，当电阻为 87 654.3Ω

时，其误差为 87 654.3×0.1%≈87.7(Ω).

电阻箱面板上方有 0，0.9Ω，9.9Ω，9999.9Ω 四个接线柱，0 分别与其余三个接线柱构成所使用的电阻箱的三种不同调整范围. 使用时，可根据需要选择其中一种，如使用电阻小于 10Ω 时，可选 0～9.9Ω 两接线柱，这种接法可避免电阻箱其余部分的接触电阻对使用的影响. 不同级别的电阻箱，规定允许的接触电阻标准亦不同. 例如，0.1 级规定每个旋钮的接触电阻不得大于 0.002Ω，当被测电阻较大时，它带来的误差微不足道，但在电阻值较小时，这部分误差却很可观. 例如，一个六钮电阻箱，当阻值为 0.5Ω 时接触电阻所带来的相对误差为$\frac{6\times0.002}{0.5}=2.4\%$，为了减少接触电阻，一些电阻箱增加了小电阻的接头. 如图 3.0.6 所示的电阻箱，当电阻小于 10Ω 时，用 0 和 9.9Ω 接头可使电流只经过×1Ω、×0.1Ω 这两个旋钮，即把接触电阻限制在 2×0.002Ω＝0.004Ω 以下；当电阻小于 1Ω 时，用 0 和 0.9 接头可使电流只经过×0.1Ω 这个旋钮，接触电阻就小于 0.002Ω. 标称误差和接触电阻误差之和就是电阻箱的误差.

2) 滑线变阻器

滑线变阻器的结构如图 3.0.7 所示，电阻丝密绕在绝缘瓷管上，电阻丝上涂有绝缘物，各圈电阻丝之间相互绝缘. 电阻丝的两端与固定接线柱 A、B 相联，A、B 之间的电阻为总电阻. 滑动接头 C 可以在电阻丝 AB 之间滑动，滑动接头与电阻丝接触处的绝缘物被磨掉，使滑动接头与电阻丝接通. C 通过金属棒与接线柱 C' 相连，改变 C 的位置，就改变 AC 或 BC 之间的电阻值. 使用滑线变阻器，虽然不能准确地读出其电阻值的大小，但却能近似连续地改变电阻值.

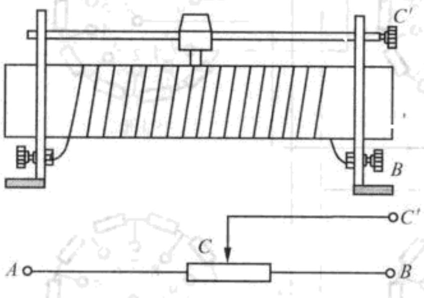


图 3.0.7

滑动变阻器的规格：

(1) 全电阻. AB 间的全部电阻值.

(2) 额定电流. 滑线变阻器允许通过的最大电流.

滑线变阻器有两种用法：

(1) 限流电路.

如图 3.0.8 所示，A、B 两接线柱只使用一个，另一个空着不用. 当滑动 C 时，AC 间电阻改变，从而改变了回路总电阻，也就改变了回路的电流(在电源电压不变的情况下). 因此滑线变阻器起到了限制(调节)线路电流的作用.

为了保证线路安全，在接通电源前，必须将 C 滑至 B 端，使 R_{AC} 有最大值，回路电流最小. 然后逐步减小 R_{AC} 值，使电流增至所需要的数值.

(2) 分压电路.

如图示 3.0.9 所示，滑线变阻器两端 A、B 分别与开关 K 两接线柱相连，滑动头 C 和一固定端 A 与用电部分连接. 接通电源后，AB 两端电压 U_{AB} 等于电源电压 E. 输出电压 U_{AC} 是 U_{AB} 的一部分，随着滑动端 C 位置的改变，U_{AC} 也在改变. 当 C 滑至 A 时，输出电压 $U_{AC}=0$；当 C 端滑至 B 时，$U_{AC}=U_{AB}$，输出电压最大. 所以分压电路中输出电压可以调节

为零，然后逐步增大 U_{AC}，直至满足线路的需要.

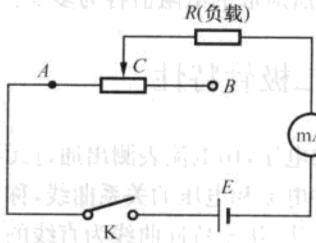


图 3.0.8

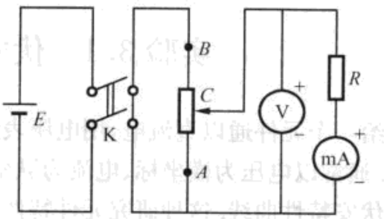


图 3.0.9

【思考题】

(1) 若安装在墙上的单相 220V 闸刀开关内的保险丝已被熔断，试问：操作者重新接保险丝前应注意什么？应如何操作才安全？

(2) 试分析图 3.0.10 所示的电路中 R_1、R_2、R_3 各起何作用. 若要尽可能调小 I(mA)，该如何调 R_1、R_2、R_3？

(3) 某电路中有一个控流(降压)电阻，阻值为 1kΩ，额定功率为 10W，试问它能承受的最大电流、电压各是多少？

(4) 在如图 3.0.11 所示的直流电路中，已知直流稳压电源的最高输出电压为 45V，额定输出电流为 2.0A，试问：在下述三中负载电阻的情况下，稳压电源输出电压各为多大范围才安全？

① 负载为 15Ω，额定功率为 15W；

② 负载为 15Ω，额定功率为 150W；

③ 负载为 150Ω，额定功率为 15W.

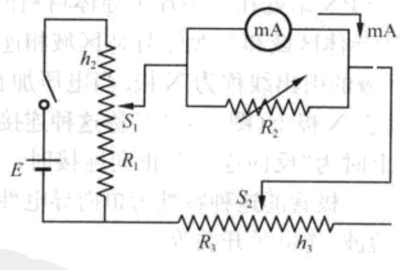


图 3.0.10

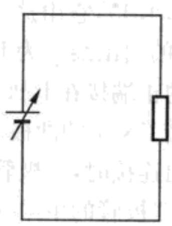


图 3.0.11

(5) 用一个 0.5 级的量程为 3V 的直流伏特计去测量电压，指针恰好指在 2V 的刻度线上，试问：如何用有效数值记录该电压值？

(6) 转盘电阻箱每个转盘步进电阻的额定功率均设计为 0.25W. 以 ZX-21 型转盘电阻箱为例，试求

① 各转盘(挡)[×0.1，×1，…，$\times 10^4$ 共 6 个十进位转盘]的额定电流值.

② 当此电阻箱取 $5.000\times 10^4\Omega$ 时，其额定电压为多少伏？

③ 当此电阻箱先后取值为 9.9Ω 和 10.0Ω 时，其额定电压各为多少伏？

④ 整个转盘电阻箱所能承受的最大电压值及此时所应取的电阻值各为多少？

实验 3.1 伏安法测晶体二极管特性

给一个元件通以直流电，用电压表测出元件两端的电压，用电流表测出通过元器件的电流. 通常以电压为横坐标、电流为纵坐标，画出该元件电流和电压的关系曲线，称为该元件的伏安特性曲线. 这种研究元件特性的方法称为伏安法. 伏安特性曲线为直线的元件称为线性元件，如电阻；伏安特性曲线为非直线的元件称为非线性元件，如二极管、三极管等. 伏安法的主要用途是测量研究线性和非线性元件的电特性.

非线性电阻总是与一定的物理过程相联系，如发热、发光和能级跃迁等，江崎玲、於奈等人因研究与隧道二极管负电阻有关的现象而获得 1973 年的诺贝尔物理学奖.

【实验目的】

(1) 具体了解和分析二极管的伏安特性曲线.

(2) 学会分析伏安法的电表接入误差，正确选择电路使其误差最小.

(3) 学会电表、电阻器、电源等基本仪器的使用.

【实验器材】

安培计、伏特计、变阻器、转盘电阻箱、甲电池、待测二极管、导线、双刀双掷倒向开关、单刀开关

【实验原理】

半导体二极管的核心是一个 PN 结，这个 PN 结处在一小片半导体材料的 P 区与 N 区之间(图 3.1.1)，它由这片材料中的 P 型半导体区域和 N 型半导体区域相连所构成. 连接 P 型区域的引出线称为 P 极，连接 N 型区域的引出线称为 N 极. 当电压加在 PN 结上时，若电压的正端接在 P 极上，电压的负端接在 N 极上(图 3.1.2)，称这种连接为“正向连接”；反之，当 PN 结的两极反向连接到电压上时为“反向连接”. 正向连接时，二极管很容易导通，反向连接时，二极管很难导通. 我们称二极管的这种特性为单向导电性. 实验工作中往往利用二极管的单向导电性进行整流、检波、作电子开关等.

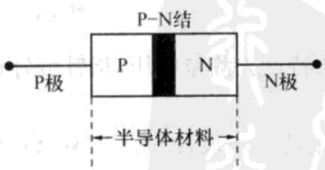


图 3.1.1

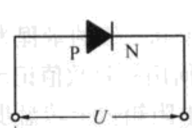


图 3.1.2

二极管电流随外加电压变化的关系曲线称为伏安特性曲线. 二极管的伏安特性曲线

如图 3.1.3 和图 3.1.4 所示. 这两个图说明了二极管的单向导电性. 由图可见,在正向区域,锗管和硅管的起始导通电压不同,电流上升的曲线斜率也不同.

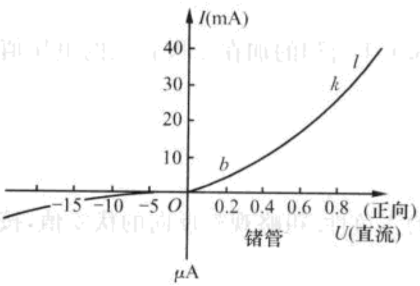


图 3.1.3

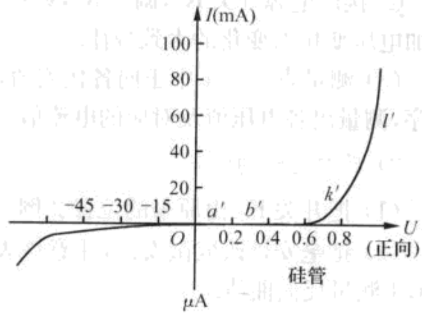


图 3.1.4

利用绘制出的二极管的伏安特性曲线,可以计算出二极管的直流电阻及表征其他特性的某些参数. 二极管直流电阻(正、反向电阻)R 等于该管两端所加的电压 U 与流过它的电流 I 之比,即 $R=U/I$. R 是随 U 的变化而变化的,我们通常用万用表所测出的二极管的电阻为某一特定电压下的直流电阻.

【实验内容】

1. 伏安法测二极管 2AP13(锗管)的伏安特性曲线

按表 3.1.1 的要求测量锗管 2AP13 的正反向特性曲线.

表 3.1.1

正向	U/V	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	……
	I/mA						≤15
反向	U/V	1.0	1.5	2.0	2.5		
	I/μA						

1) 正向曲线的测量

(1) 按照图 3.1.5 连接好电路,并把仪器调在待测安全状态.

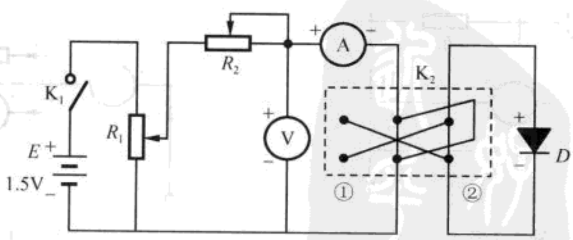


图 3.1.5

(2) 粗略观察正向导电现象.

① 先将开关 K_2 倒向②.

② 接通电源开关 K_1，调节 R_1，观察二极管上的电压、电流值所受的影响，注意电流随外加电压变化而变化的大致规律.

(3) 测量表 3.1.1 中正向各伏安值，即按表 3.1.1 所列的加在二极管上的电压值的顺序，测量出各电压值及对应的电流值.

2) 反向曲线的测量

(1) 把开关 K_2 由原来的位置②倒向①.

(2) 把毫安计改成微安计，注意该表接线柱的正负性. 粗略观察反向的伏安值，按表 3.1.1 测量反向曲线.

(3) 画出正反向伏安特性曲线. 测得的点应大致交错地分布在平滑曲线的两侧附近.

2. 用图 3.1.5 测晶体二极管 2CP13(硅管)的伏安特性曲线

(1) 其测量方法步骤与前述方法相同. 测量所取电压值及其安全范围见表 3.1.2.

表 3.1.2

正向	U/V	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	…
	I/mA						≤75
反向	U/V	1.0	1.5	2.0	2.5		
	I/μA						

注：对 2CP13 其 I 不得超过 75mA.

(2) 画出正反向伏安特性曲线.

3. 用"最佳"电路测 2AP13 的曲线(选做)

由于下面三种因素，使所测得的点(U, I)总有或大或小的电表接入误差：

(1) 电表Ⓐ、Ⓥ都有其内阻.

(2) 两种伏安法测量电路(图 3.1.6、图 3.1.7)因电表有内阻，产生了各自的电表接入误差.

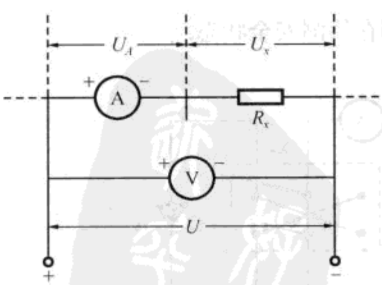


图 3.1.6

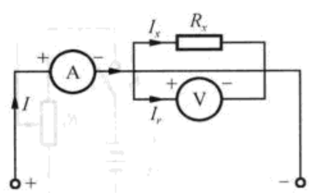


图 3.1.7

(3) 二极管的电阻值随所加电压值的变化而变化，其值变化范围很大.

因此，应该根据粗略测得的Ⓐ、Ⓥ和二极管的具体电阻值估算两种伏安法电路的电表接入误差，从中选取误差较小者再进行U、I值的较准确的测量，即用"最佳"电路测量U、I值，并估算出此最小的电表接入误差值.

Ⓐ、Ⓥ的内阻可以用它们分别组成的串、并联电路测量出.

【预习思考】

(1) 在图3.1.5中，为什么说将开关K_2倒向②时二极管是正向连接，倒向①时二极管便成了反向连接？试根据上述两种情况从该电路图中找出电流的流动方向.

(2) 现有两个被测电阻，其阻值分别为数欧、数千欧，需要用伏安法测量其阻值，问各选哪种电路进行测量较为合适？

(3) 如何用万用表判断二极管的正负极，并检查二极管的好坏？

【习题】

(1) 试从测得的硅、锗二极管正向伏安特性曲线比较出哪种二极管的起始导通电压低些.

(2) 若已经知道所用Ⓥ的内阻$R_V=1\times10^3\,\Omega$，ⓂⒶ的内阻R_{mA}小于等于几欧，而二极管的正向电阻约为$1\times10^2\sim1\times10^4\,\Omega$. 试分析，用图3.1.6和图3.1.7两种电路分别测出的正反向伏安特性曲线哪一条更接近真实曲线？

(3) 用(mV)、(mA)先后组成串、并联电路，用伏安法分别测量(mV)、(mA)的内阻，此时的电表接入误差分别为多少？

实验3.2 直流电桥测电阻

测量电阻的阻值在不同场合、不同精度要求下有不同测量方法，而且这些方法各有其优势. 本实验主要学习直流电桥测量电阻的原理和方法，其中直流单臂电桥主要用于测量中值电阻，直流双臂电桥是专门为测量低电阻而设计的.

【实验目的】

(1) 掌握单臂直流电桥测电阻的原理及测量方法.

(2) 了解双臂电桥测量低值电阻的原理及测量方法.

【实验器材】

板式滑线电桥一套、QJ-24单臂电桥一台、QJ-19型两用直流电桥一台、AC/15/5型检流计一台、微安表一个、甲电池一个、稳压电源一台、标准电阻2个.

【实验原理】

电桥测量法是电磁学实验中最重要的测量方法之一，有着非常广泛的应用. 它具有灵敏度和准确度高、结构简单、使用方便的特点. 下面分别介绍直流单臂电桥(惠斯通电桥)和直流双臂电桥(开尔文电桥).

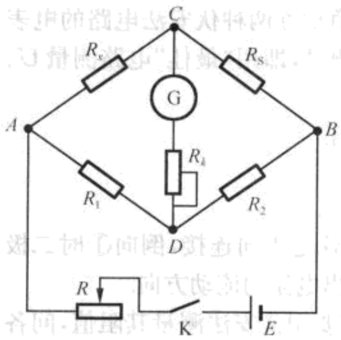


图 3.2.1

1. 直流单臂电桥(惠斯通电桥)

直流单臂电桥的基本电路原理图如图 3.2.1 所示. R_1、R_2、R_x、R_s 为四个电阻,构成电桥的四个臂,其中 R_x 为待测电阻,常称为测量臂;R_S 为已知电阻,称标准电阻,常称比例臂;R_1、R_2 也为已知电阻,常称比较臂. 在 A、B 对角线间接电源、限流电阻、开关,在 C、D 对角线间接检流计、保护电阻和开关. 当接通两个开关时,R_1、R_2、R_x、R_S、检流计 G 上分别有电流 I_1、I_2、I_x、I_S、I_g. 适当的调节各臂的电阻值,可使得检流计电流 I_g 为 0,即可调得 C、D 两点电位相等,此时称电桥达到了平衡. 当电桥平衡时,由 $I_g=0$,即 $V_C=V_D$,可知

$$U_{AD}=U_{AC},\quad U_{BD}=U_{BC}$$
$$I_1=I_2,\quad I_x=I_S$$

由欧姆定律得

$$I_xR_x=I_1R_1 \tag{3.2.1}$$
$$I_SR_S=I_2R_2 \tag{3.2.2}$$

由(3.2.1)式和(3.2.2)式可得

$$\frac{R_x}{R_S}=\frac{R_1}{R_2} \tag{3.2.3}$$

即

$$R_x=\frac{R_1}{R_2}R_S \tag{3.2.4}$$

单臂电桥中最简单而又直观的是板式电桥,如图 3.2.2 所示是一种板式滑线电桥. AB 是一均匀的电阻丝,固定在一米尺上,D 点可在 AB 上滑动,CD 间接有检流计 G,R_S 为标准电阻,R_x 为待测电阻,AB 端接有电池、保护开关 K、限流电阻 R(R 调节工作电流用),D 把 AB 分成 AD、DB 两段电阻丝,对应长度为 l_1、l_2,组成比例臂. 选定 R_S,调节 D 点位置,使检流计电流为零,电桥达到平衡,C、D 两点电位相等,有

$$R_x=\frac{l_1}{l_2}R_S \tag{3.2.5}$$

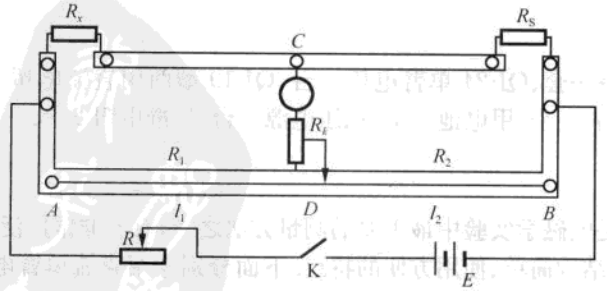


图 3.2.2

2. 直流双臂电桥(开尔文电桥)

直流单臂电桥测量中值电阻有较高的精确度，是测量电阻的很好装置. 但是对于低值电阻($10^{-3}\sim10^{-5}\,\Omega$)就很难精确测量. 这是因为：①待测电阻与接线端有接触电阻；②连接的导线也有电阻，这些电阻不大，但在测量低值电阻时，其值就可能与低电阻相比较而不能忽略. 直流双臂电桥是专门为测量低电阻而设计的，基本原理图如图 3.2.3 所示，其中 R_x、R_S 为低值电阻，R_x 为低值待测电阻，R_S 为标准低值电阻. 它通常由四端组成，两端为电流端，以两个粗端钮表示，而靠近两端内侧有两个较细的端钮，为电压测量端. R_3、R_4、r_1、r_2 为中值电阻，比导线的电阻、接触电阻大得多，也比待测电阻及标准低值电阻大得多. 设计时严格保证 $R_4/R_3=r_1/r_2$，因此，当电桥平衡时，有

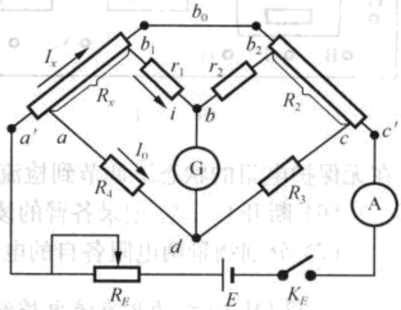


图 3.2.3

$$I_xR_x = R_4I_4,\quad I_xR_2 = R_3I_4$$

两式相除，得

$$\frac{R_x}{R_2}=\frac{R_4}{R_3}$$

若 R_2 为标准电阻 R_S，则上式与单臂电桥有相同的公式

$$R_x=\frac{R_4}{R_3}R_S \tag{3.2.6}$$

【实验内容】

1. 用板式电桥测电阻

(1) 按图 3.2.2 接好线路，R_S 最好选择与待测电阻接近的标准电阻，R 取较小的电阻，R_k 先调至最大. 检流计 C 点接好后，滑动头 D 点先不要按下.

(2) 合上电源开关 K，按下滑动头 D，观察检流计 G 的偏转情况. 如偏转过大，应赶快松手，在偏转不太大的情况下，按下 D 点，在电阻丝上滑动，找出平衡点.

(3) 将 R_k 调至最小，找出更为准确的平衡点，记下 l_1、l_2.

(4) 改变 R_S 的值，用同样的方法，测量 5 次，将记录的数据填入表格中.

(5) 用同样的方法测量第二个电阻，取 5 组数据.

(6) 以上面的步骤测量两电阻串联之值.

(7) 以上面的步骤测量两电阻并联之值.

(8) 测量完后先断开滑动头与电阻丝的接触，再断开电源开关 K.

2. 用 QJ-24 型直流单臂电桥测量电阻(图 3.2.4)

(1) 调节好检流计的机械零点.

(2) 将待测电阻接在 X_1、X_2 上.

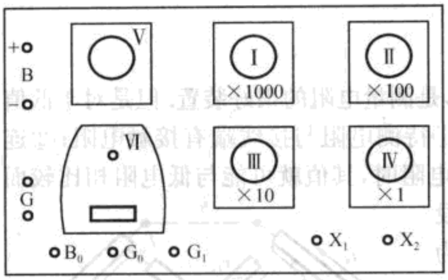


图 3.2.4

(3) 将比例臂Ⅴ和比较臂Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ调节到适当位置,使电桥在接近平衡位置的状态下使用.

(4) 先按下电源按钮 B_0,再按下检流计按钮 G_1,如完全不知待测电阻的状况,此时应特别注意检流计的偏转情况,如偏转太大,应立刻松开按钮 B_0、G_1,根据偏转方向调节电桥各臂,使检流计指示为零,电桥达到平衡.

(5) 按下 B_0、G_0 进行精确调节,使检流计在无保护电阻的状态下调节到检流计指示为零,电桥达到平衡.

(6) 断开 G_0、B_0,记录各臂的读数.

(7) 分别测量两电阻各自的电阻值,以及两电阻串联、并联的电阻值,记录于表中.

3. 用 QJ-19 型两用直流电桥测低电阻(自行设计测量)(图 3.2.5)

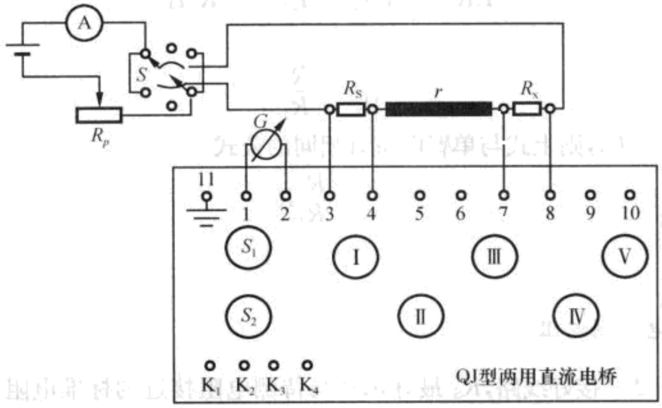


图 3.2.5

【数据处理】

(1) 用板式电桥测电阻.

R_S/Ω	50.0	100.0	150.0	200.0	250.0
l_1/cm					
l_2/cm					
R_{x1}/Ω					
R_{x2}/Ω					
R_{x1}与R_{x2}串联/Ω					
R_{x1}与R_{x2}并联/Ω					

(2) 用 QJ-24 型直流单臂电桥测量电阻表格自行设计.

(3) 用 QJ-19 型两用直流电桥测低电阻表格自行设计.

【预习思考】

(1) 图 3.2.1 中,若将对角线 CD 与对角线 AB 间的接线对换,能否测出 R_x? 试写出其计算公式.

(2) 做板式电桥实验时,若滑动 D 点,检流计始终往一个方向偏转,这是什么原因?

(3) 欲提高直流单臂电桥的灵敏度,主要有哪几种方法?

【习题】

(1) 写出正确使用自组电桥的测量步骤.

(2) 如何选择 R_1、R_2 的比值,提高测量精度需要采取什么措施?

实验 3.3　用补偿法测量电压、电流和电阻

电位差计是精密测量中应用最广的仪器之一,不但能用来精确测量电动势、电压、电流和电阻等,还可用来校准精密电表和直流电桥等直读式仪表,在非电参量(如温度、压力、位移和速度等)的电测法中也占有重要地位.

【实验目的】

(1) 掌握补偿法的原理,了解其优缺点.

(2) 掌握 UJ-31 型直流电位差计的原理、构造及使用方法.

(3) 学会用 UJ-31 型电位差计来校准微安表和测量内阻.

【实验器材】

滑线式电位差计一套、UJ-31 型直流电位差计一台、检流计一台、标准电池、工作电源、待测电池、微安表头、直流电阻箱.

【实验原理】

电压的测量一般用伏特表来完成. 由于电压表并联在测量电路中,有分流作用,会对原电路两端的电压产生影响,测得的电压并不是原电路的电压. 用电压表测量电源电动势时,由于电压表的引入,电源内部将有电流,而电源一般有内阻,内阻将有电压降,从而电压表读数是电源的端电压,它小于电源的电动势. 由此可知,要测量电动势,必须让电源无电流输出.

补偿法是电磁测量中一种常用的精密测量方法,它可以精确地测量电动势、电位差和低电阻,是学生必须掌握的方法之一.

滑线式电位差计、UJ-31 型电位差计或学生型电位差计 UJ-36 等都是根据补偿法原

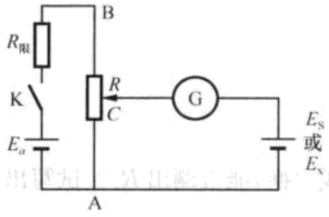


图 3.3.1

理而设计的仪器.补偿的电路原理图如图 3.3.1 所示.

由 E_a、K、$R_限$ 和 R 组成的回路称工作回路;由 E_S 或 E_x 与检流计 G 组成测量支路,与 R 一起组成测量回路.当 $E_a>E_S$,$E_a>E_x$ 时,选择适当的 $R_限$,调节 R 的滑点,可使检流计 G 中无电流流过.此时有 $U_{AC}=E_S$.在 $R_限$ 不变的情况下,将 E_S 换成 E_x,再调节 R,若调节到 C′位置使检流计无电流流过,则 $U_{AC}=E_x$.因此,有

$$IR_{AC}=U_{AC}$$

$$IR_{AC'}=U_{AC'}$$

$$\frac{R_{AC}}{R_{AC'}}=\frac{E_S}{E_x}$$

即

$$E_x=\frac{R_{AC}}{R_{AC'}}E_S \tag{3.3.1}$$

测量支路中无电流流过,那么 E_S 或 E_x 就是它们的电动势,由此可知电压补偿法测量电动势或电位差时比一般电表法更为准确.由图 3.3.1 可知,用补偿法测电动势时,需一个标准电池(标准电动势)作为标准比较.标准电池的电动势比较稳定,精度比较高.图中 $R_限$ 起调节工作电流的作用,工作电流越大,分压电阻 R 上单位电阻上的电压降就越大;工作电流越小,分压电阻上单位电阻上的电压降越小,表示测量精度越高.检流计 G 灵敏度越高,测量精度越高.

下面介绍两种常用的电位差计的基本原理.

1. 线式电位差计基本原理

如图 3.3.2 所示,按通 K_1 后,有电流 I 通过电阻丝 AB,并在电阻丝上产生电压降 IR.如果再接通 K_2,可能出现三种情况:

(1) 当 $E_x>U_{CD}$ 时,G 中有自右向左流动的电流(指针偏向右侧).

(2) 当 $E_x<U_{CD}$ 时,G 中有自左向右流动的电流(指针偏向左侧).

(3) 当 $E_x=U_{CD}$ 时,G 中无电流,指针不偏转.将这种情形称为电位差计处于补偿状态,或者说待测电路得到了补偿.

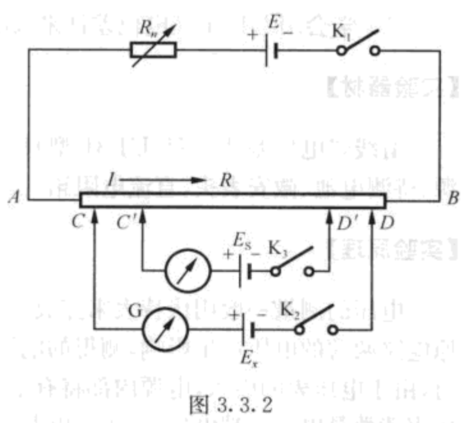


图 3.3.2

在补偿状态时,$E_x=IR_{CD}$.设每单位长度电阻丝的电阻为 r_0,CD 段电阻丝的长度为 L_x,于是

$$E_x=Ir_0L_x \tag{3.3.2}$$

将保持可变电阻 R_n 及稳压电源 E 输出电压不变,即保持工作电流 I 不变,再用一个电动势为 E_S 的标准电池替换图中的 E_x,适当地将 C、D 的位置调至 C'、D',同样可使检流

计G的指针不偏转,达到补偿状态.设这时$C'D'$段电阻丝的长度为L_S,则

$$E_S = IR_{C'D'} = Ir_0L_S \tag{3.3.3}$$

将上两式比较得到

$$E_x = E_S\frac{L_x}{L_S} \tag{3.3.4}$$

(3.3.4)式表明,待测电池的电动势E_x可用标准电池的电动势E_S和在同一工作电流下电位差计处于补偿状态时测得的L_x和L_S值来确定.可见电位差计测量的结果仅仅依赖于准确度极高的标准电池、标准电阻(或均匀电阻丝)以及高灵敏度的检流计,测量准确度可达到0.01%甚至更高.

2. UJ-31型电位差计基本原理

图3.3.3是UJ-31型电位差计的原理简图.UJ-31型电位差计是一种测量直流低电位差的仪器,量程分为17mV(最小分度1μV,倍率开关K_1旋至×1)和170mV(最小分度10μV,倍率开关旋到×10)两挡.该电路共有3个回路组成:①工作回路;②校准回路;③测量回路.

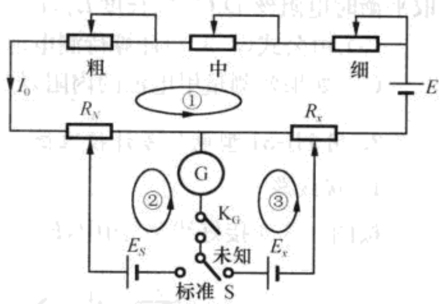


图3.3.3

(1) 校准.为了得到一个已知的"标准"工作电流$I_0=10$mA.将开关S合向"标准"处,E_S为标准电动势,取值范围为1.0178～1.0190V,$R_N=101.78\Omega$,R_{pN}为12个0.01Ω的电阻,对应"粗""中""细"三个旋钮,调节这三个电阻旋钮使检流计G指零,显然

$$I_0 = \frac{E_S}{R_N+R_{pN}} = 10.0000\text{mA} \tag{3.3.5}$$

(2) 测量.将开关S合向"未知"测量处,E_x是未知待测电动势.保持$I_0=10$mA,调节R_x使检流计G指零,则有

$$E_x = I_0R_x \tag{3.3.6}$$

被测电压E_x与补偿电压极性相反、大小相等,因而相互补偿(平衡).这种测量未知电压的方式叫做"补偿法".

补偿法具有以下优点:

(1) 电位差计是一电阻分压装置,它将被测电压U_x和标准电动势加以比较.U_x的值仅取决于电阻比及标准电动势,因而能够达到较高的测量准确度.

(2) 上述"校准"和"测量"两步骤中,检流计两次均指零,表明测量时既不从标准回路内的标准电动势源(通常用标准电池)中也不从测量回路中吸取电流.因此,不改变被测回路的原有状态及电压等参量,同时可避免测量回路导线电阻、标准电池的内阻及被测回路等效内阻等对测量准确度的影响,这是补偿法测量准确度较高的另一个原因.

【实验内容】

1. 用滑线式电位差计测量电池的电动势

(1) 按图 3.3.5 接好线路，A、B 两端为 11 线电阻丝的两端，即将 11 线电阻丝全部串联在工作回路中，将限流电阻 R_n 调至 40Ω 左右.

(2) 接通 K_1，工作回路有电流流过，工作电路的电流大小由工作电源 E、11m 电阻丝的电阻及 R_n 决定. E 及 11m 电阻丝是选定了的，主要靠调节 R_n 控制工作电流；工作电源 E 的电动势要大于标准电池或待测电池的电动势.

(3) 将 K_2 倒向标准电池 E_S 一侧，插头 C 选在 67m 段电阻丝插孔，D 在米尺电阻丝上滑动，由米尺读数，找出平衡点，读出平衡时 D_SC_S 电阻丝的长度 L_S，在表 3.3.1 中记录下来.

(4) 将 K_2 倒向待测电池 E_x 方向，选定插头 C 的位置，调节滑动头 D，找出平衡点，读取平衡时电阻丝 D_xC_x 的长度 L_x，记录于表中.

(5) 由公式(3.3.4)计算待测电池电动势.

(6) 如果要测量甲电池的内阻，如何测量?

2. 用 UJ-31 型电位差计校准微安表和测量其内阻

1) 接线路

按图 3.3.4 接好线路. 图中，E_N 为标准电池，G 为检流计，E 为工作电源(要求其工作电压在 5.7～6.4V 内)，E_x 为待测电路的电源；R 为降压电阻箱，R_S 为标准电阻 100Ω.

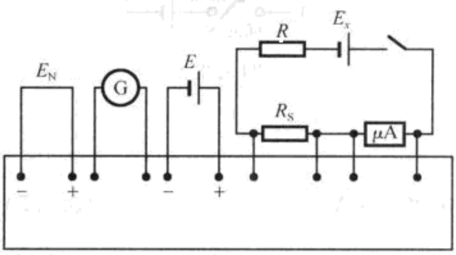


图 3.3.4

2) UJ-31 的校准

(1) 将 UJ-31 上的操作开关 K_2 置于“断”位置. 先调好检流计光点为零，选择光电检流计为×0.01 挡.

(2) 根据当时温度计算标准电池的电动势，将温度补偿盘 R_N 置于此值.

(3) 将 K_2 调至“标准”，量程变换开关 K_1 调至×10 挡.

(4) 按下电键“粗”按钮，调节工作电流调节电阻 R_{p1}(粗)、R_{p2}(中)、R_{p3}(细)，使检流计指示为零. 检流计如指示摆动太大太快，应立即松开按钮、并注意使用“短路”按钮，以保护检流计.

(5) 逐步将检流计换为×0.1 挡，×1 挡，重复(4)的步骤.

(6) 最后按“细”按钮，检流计放在×1 挡，调节粗、中、细电阻调节旋钮使检流计指示为零，表示已校准好 UJ-31，即工作电流已校准为 10.0000mA.

3) 校准微安表并测表头内阻

(1) 温度补偿盘 R_N 不动，电流调节电阻 R_{p1}(粗)、R_{p2}(中)、R_{p3}(细)不动，将 K_1 调到×1 挡，K_2 调到“未知 1”，检流计调到×0.01 挡，按“粗”按钮，调节电阻盘Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ，使

检流计指示为零.

(2) 逐步将检流计换成×0.1挡、×1挡,调节Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ使检流计指示为零.

(3) 按"细"按钮,在检流计×1挡时,调节Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ使检流计指示为零.记下此时Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ的读数.从而得到

$$U_{未知1}=(\text{Ⅰ}\times 1+\text{Ⅱ}\times 0.1+\text{Ⅲ}\times 0.001)\times K_1(\text{mV})$$

(4) 将 K_2 拨到"未知2",K_1 拨到×10挡,按测未知1的方法测出未知2.然后根据公式$\frac{U_{未知1}}{R_S}=\frac{U_{未知2}}{R_{\mu A}}$得出微安表的内阻 $R_{\mu A}$.

(5) 依次将微安表电流调至 100μA,80μA,60μA,40μA,20μA,校准微安表,列表3.3.2记录.

【数据处理】

表 3.3.1 用滑线式电位差计测量电池的电动势

测量次数	电阻丝长度 L_S/m	电阻丝长度 L_x/m	待测电动势 E_x/V	$\overline{E_x}$
1				
2				
3				
4				
5				
6				

表 3.3.2 用 UJ-31 型电位差计校准微安表和测量其内阻

微安表读数/μA	$U_{未知1}$/V	$U_{未知2}$/V	通过微安表的实际电流/μA	差 值
100				
80				
60				
40				
20				

【预习思考】

(1) 为什么用电位差计可直接测电源的电动势?能否用伏特表测电动势?若可测,写出测量方法.

(2) 检流计始终无偏转可能是什么原因造成的?

(3) 滑线式电位差计对测量范围有何限制?

(4) 使用光电式检流计要注意什么事项?

(5) 标准电阻应如何接入到电路中?

【习题】

(1) 如果电阻丝的电阻每米为 5Ω,$E=3$V,标准电池 $E_S=1$V,待测电池 $E_x=1.5$V左右,限流电阻 R_n 如何取值?

(2) 无论如何滑动滑线电位差计上的滑动头 C，检流计始终朝一个方向偏转，可能是何原因？

(3) 如果工作电源的电动势 E 比待测电池电动势 E_x 小，能否做实验？为什么？能否用 UJ-31 型电位差计来直接测量甲电池的电动势？为什么？

(4) 在校准 UJ-31 电位差计的过程中，尽管电流调节电阻 R_{pN} 从最大值调到最小值，却仍然找不到平衡状态. 试问：此故障有哪三种可能的原因？

【附录】

1. 十一线式电位差计

十一线式电位差计具有结构简单、直观、便于分析讨论等优点，其结构如图 3.3.5 所示. 电阻丝 AB 长 5.5m，往复绕在有机玻璃板的 11 个接线插柱上，每相邻两个接线柱间电阻丝有效长度为 0.5m. 插头 C 可连接在 0，1，…，10 中任一个位置. 电阻丝 B0 旁边附有带毫米刻度的米尺，触头 D 在它上面滑动. CD 间的电阻丝长度可在 0～5.5m 间连续变化. R_n 为可变电阻箱，用来调节工作电流. 转换开关 K_2 用来选择接通标准电池 E_S 或待测电池 E_x. 滑线变阻器 $R_滑$ 是用来保护标准电池和检流计的，在电位差计未处于补偿状态时，必须调到最大，在电位差计处于补偿状态进行读数时，应调到最小，以提高测量的灵敏度.

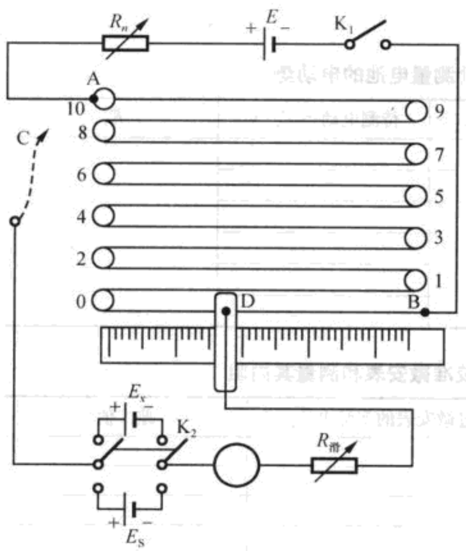


图 3.3.5

2. UJ-31 型低电势直流电位差计

UJ-31 型低电势直流电位差计面板图如图 3.3.6 所示.

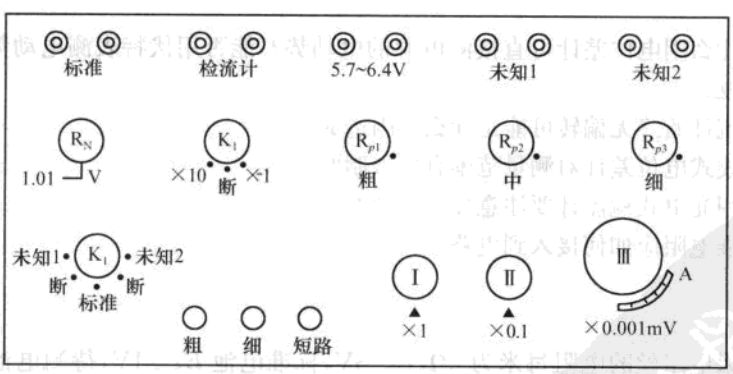


图 3.3.6

(1) 五组接线端钮(标准、检流计、工作电源接入端、未知1、未知2);

(2) 标准电池电动势的温度补偿盘 R_N;

(3) 工作电流调节电阻盘 R_{pN}(分为 R_{p1}、R_{p2}、R_{p3});

(4) 测量调节电阻盘Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ,其中第Ⅲ盘带有游标尺A;

(5) 电位差计量程变换开关 K_1;

(6) 标准回路和测量回路的转换开关 K_2;

(7) 电键按钮("粗"、"细"、"短路").

UJ-31型电位差计使用的电源是5.7~6.4V的直流电源,其工作电流为10mA.它的三个工作电流调节盘中,第一个盘(R_{p1})是16点步进的转换开关,第二盘(R_{p2})和第三盘(R_{p3})均为滑线盘.标准电池电动势温度补偿盘 R_N 的补偿范围为1.0180~1.0196V.

该仪器有两个测量端,通过转换开关 K_2 可接通"未知1"或"未知2"或"标准电池".在它的三个测量调节电阻盘中,第Ⅰ测量盘是16点步进转换式开关,第Ⅱ测量盘是10点步进转换式开关,第Ⅲ测量盘是滑线盘;测量盘的电阻值已转换成电压刻度标在了仪器面板上.

该仪器的量程变换开关 K_1 有两挡:在"×1"挡,测量范围是0~17.1mV,测量盘的最小分度值为1μV,游标尺的分度值为0.1μV;在"×10"挡,测量范围是0~171mV,测量盘的最小分度值为10μV,游标尺的分度值为1μV.

UJ-31型电位差计电路图如图3.3.7所示.

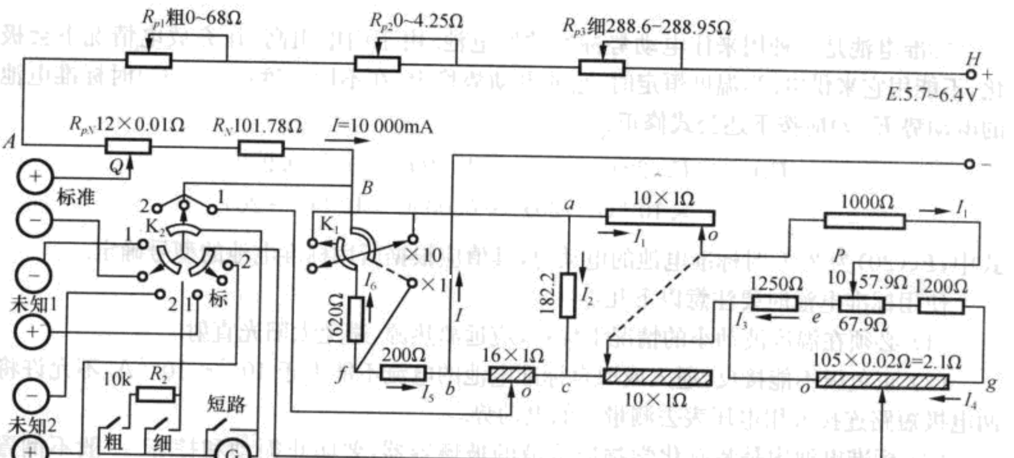


图3.3.7

3. AC15/4型直流复射式检流计

它是一种磁电式高灵敏度仪表,采用光点复射式(光标多次反射再投射到刻度尺上)读数,故又叫光点检流计.其分度值约 5×10^{-9}A·分度$^{-1}$,用来测量微小电流(10^{-7}~

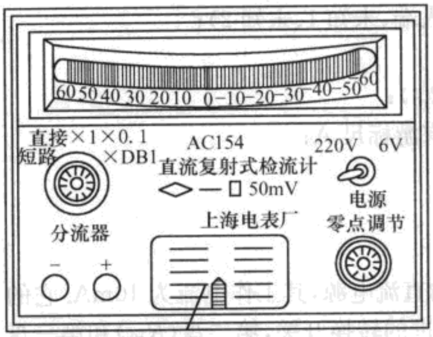


图 3.3.8

10^{-9}A)或微小电压(10^{-5}～10^{-7}V),如光电流、生物电流及温差电动势等,也常作为电桥和电位差计的零指示器,以提高测量的准确度. 仪器面板 3.3.8 所示. 使用方法及注意事项:

(1) 移动检流计或使用完毕时,“分流器”均应置于“短路”挡;因线圈的金属悬丝很细、易断,切忌摇晃、震动,操作时动作一定要轻.

(2) 供电有交流 220V 和直流 6V 两种方式,实验室接 220V 电源,不得插错;面板“电源”开关扳向所选择的供电方式;一般电流由“+”流入检流计时,光标向右偏.

(3) 使用前要调零:先调节“零点调节”,使光标中线指在中间“0”左右,然后移动标尺上的金属小柱使光标精确指“0”.

(4) 找不到光点时,可将“分流器”旋钮旋至“直接”;当光标摆动不停时,可旋向“短路”,使检流计受到阻尼而停止摆动.

(5) “分流器”选择旋钮“×0.01”、“×0.1”、“×1”等,其中“×1”为灵敏度最高挡,使用时,可先选最低挡,调节后再换高灵敏挡.

4. 标准电池

标准电池是一种用来作电动势标准的原电池. 由于内电阻高,在充放电情况下会极化,不能用它来供电. 当温度恒定时,它的电动势稳定. 在不同温度(0～40℃)时标准电池的电动势 $E_S(t)$ 应按下述公式修正:

$$E_S(t)=E_S(20)-39.94\times10^{-6}(t-20)-0.929\times10^{-6}(t-20)^2+0.0090\times10^{-6}(t-20)^3$$

式中,$E_S(20)$ 为 20℃时标准电池的电动势,其值应根据所用标准电池的型号确定.

使用标准电池时要注意以下几点:

(1) 必须在温度波动小的情况下保存,应远离热源,避免太阳光直射.

(2) 正负极不能接反,通入或取自标准电池的电流不能大于 10^{-5}～10^{-6}A. 不允许将两电极短路连接或用电压表去测量它的电动势.

(3) 标准电池内是装有化学物质溶液的玻璃容器,要防止振动和摔坏. 一般不倒置(容器内加了微孔塞片的标准电池可防止因倒置而损坏).

实验 3.4　静电场的模拟与描绘

静电场是由电荷分布决定的. 带电导体在空间形成的静电场,对比较简单的情况,可通过理论计算得到其电场分布. 但对大多数情况则无法得到其数学表达式,也就不能求解出其电场分布. 为了解这些情况下的电场分布,通常借助实验的方法来测定出其电场分

布. 由于直接测量静电场很困难,所以实验中采用间接的模拟法来进行测量,用恒定电流场来模拟静电场,即通过测绘恒定电流场的分布来描绘对应的静电场.

【实验目的】

(1) 学习模拟法测静电场的电位分布.

(2) 对静电场的分布有一具体了解.

【实验器材】

模拟电极、场装置(包括导电纸)、直流稳压电源、电阻箱、闸刀开关.

【实验原理】

对示波管、显像管、离子加速器等真空物理装置,主要问题是要设计和制造出比较满意的电极系统,使它能产生和形成的电场便于电子(离子)束的加速、聚焦、偏转. 设计和制造电极系统的工作,必须以研究电极系统和它产生的电场的分布为依据.

一般的实用电极系统,虽然能用理论计算的方法研究其场分布,但这种计算往往非常复杂,特别是场强分布的计算,因为用到矢量,它比电位分布的标量计算更困难. 模拟实验法研究电位分布较为简洁,从得出的电位分布通过微商就不难得出场强分布,因此,实际中往往从模拟实验研究电位分布入手来研究电极系统及其分布.

电极的分布包括场强分布和电位分布.

1. 无限长的同轴圆柱、圆筒电极间的静电场

我们要研究的静电场的电极是两个无限长同轴的圆柱和圆筒,它们各带等量异号电荷,置于真空中. 图 3.4.1 给出了这对电极的中间有限部分,我们只研究这部分有限电极间的静电场.

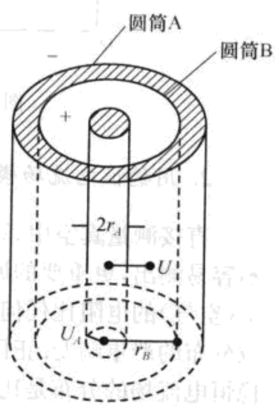


图 3.4.1

这部分空间的静电场的电位分布用高斯定理和电位差定义可以从理论上求得为

$$U = U_A \frac{\ln \frac{r_B}{r}}{\ln \frac{r_B}{r_A}} \qquad (3.4.1)$$

式中,U_A 为 A 的电位,U 为距中心为 r 的点的电位. 推导中,设圆筒 B 接地,即 $U_B=0$.

由(3.4.1)式可得出这部分空间场电位的理论分布有以下特征:

(1) 这部分空间的静电场的等位面是一系列的同轴圆柱面.

(2) 在每个垂直于轴线的截面上(圆环面上),等位线的形状是系列同心圆.

(3) 这一系列同心圆等位线的分布由下面具体的 U 和 r 的关系式表示. 把(3.4.1)式改写为

$$U = U_A \frac{\ln r_B}{\ln \frac{r_B}{r_A}} - \frac{U_A}{\ln \frac{r_B}{r_A}} \ln r$$

以 a、b 分别替换有关常数，则上式变成为

$$U = a - b\ln r \tag{3.4.2}$$

或把上式改写成反函数形式

$$r = r_B e^{-kU} \tag{3.4.3}$$

式中

$$\begin{cases} a = U_A \dfrac{\ln r_B}{\ln \dfrac{r_B}{r_A}}, \quad b = \dfrac{U_A}{\ln \dfrac{r_B}{r_A}} \\ k = \dfrac{1}{b} \end{cases}$$

由(3.4.2)式可知，U 与 $\ln r$ 呈线性关系，其关系曲线如图 3.4.2 所示.

由(3.4.3)式可知，r 是 U 的负指数函数，其曲线如图 3.4.3 所示.

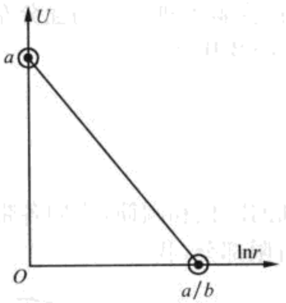


图 3.4.2

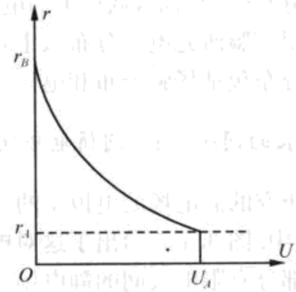


图 3.4.3

2. 用稳恒电流场模拟上述静电场

直接测量真空中 A、B 电极间的静电场的电位分布是不容易的，这不仅是由于电位值不容易测出，更重要的原因是即使电位能被测出来，其值也与原来的值相差很大，因为真空(空气)的电阻比任何伏特计的内阻都大得多，引入探针和伏特计测量，必然导致空间电位分布的严重畸变. 正因为这样，人们便巧妙地运用稳恒电流场模拟上述静电场，而这种稳恒电流场的分布是比较容易测绘出来的.

模拟的稳恒电流场由图 3.4.4 的实验装置所产生. 圆形电极 A 和环形电极 B 同心地安放在与之相应的圆形导电纸上，并使电极与导电纸间的接触电阻很小. 当两电极间加上稳恒电压时，在两电极间的导电纸上便形成一个稳恒的电流场. 这个电流场的分布(二维分布)与上述静电场的分布(三维分布)形式相同. 这样，就测出了所要研究的静电场.

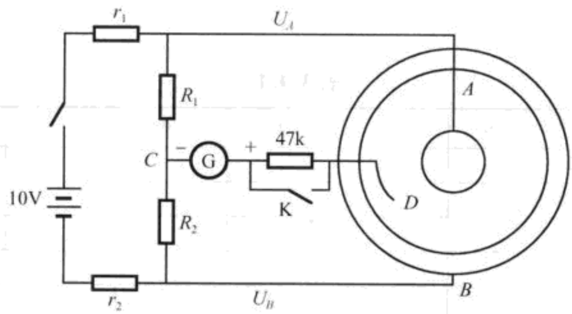


图 3.4.4

【实验内容】

按图 3.4.4 接好线路，打开开关 K. 图中：

R_1 和 R_2 构成定比分压器：R_1 为 $n\times100\Omega$，R_2 为 $m\times100\Omega$，n 和 m 均为正整数，且 $n+m=10$.

r_1 和 r_2 共同作为稳压保护电阻，均取 9.9Ω.

R_1 和 R_2、r_1 和 r_2 各为一个六转盘电阻箱.

本实验测定等位点所采用的方法是电桥平衡法. 即

第一步，确定欲测等位线的电位值 U_{CB}

$$U_{CB}=\frac{U_{AB}}{R_1+R_2}R_2$$

第二步，寻找欲测的等位线上的各等位点 D.

方法：移动探针在导电纸上的位置，当 $U_{DB}=U_{CB}$ 时（此时Ⓖ中几乎无电流流过），此时探针位置即为所寻找的等位点之一. 按下快门线，使打印头把该点在坐标上的相应位置打印下来.

先找圆形的圆心：在 A 点对称地找出 1V 的 8 个等位点，两两对称相连接，交点即为圆心.

再找 2,3,…,8V 的等位点，要求每条等位线至少测量 5 个等位点.

【数据处理】

(1) 将实验测得的 U-ln$r$ 关系曲线与理论值相比较.

将图 3.4.4 中有关参数（$r_A=7.5$mm，$r_B=75$mm，$U=10.0$V）代入(3.4.2)式中的 a、b 表达式，算出 a、b 值，则有：

$$a=18.8,\quad b=4.34,\quad k=0.230$$

$$U=18.8-4.34\ln r$$

这便是具体实验装置产生的场的电位的理论分布.

实验测出表 3.4.1 中各点，然后用坐标纸描出这些点，再用最小二乘法求出实验直线的 a、b 值，最后画出此实验直线，写出其数学表达式，并分别把 a、b 实验值与理论值相

比较.

表 3.4.1

$U_{实}$/V	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00
$\overline{r_{实}}$/mm								
$\ln\overline{r_{实}}$								
$U_{理}$/V								
$\overline{r_{理}}$/mm								
$\ln\overline{r_{理}}$								

表中,U 值为所要选取的各等位线的电位值,$\bar{r}$ 为相应的一条等位线上的数个点的 r 的平均值.

(2) 取实验的某一条等位线(如 $U=2.00\text{V}$),比较理论值与实际值是否一致.

【预习思考】

(1) 为什么要电位等间隔打点?

(2) 用电流场模拟静电场的条件是什么?

(3) 如果电源电压增加一倍,等位线和电力线的形状是否发生变化? 电场强度和电位分布是否发生变化? 为什么?

【习题】

(1) 本实验测的只是同心圆柱、圆环电极产生(二维空间内)的场分布,为什么说它能表明无限长的同心圆柱、圆筒电极产生的三维空间的场分布呢?

(2) 本实验研究的是无限长同心圆柱、圆筒电极间的静电场的哪一部分场分布? 其间还有哪一部分场我们未研究?

(3) 根据实验和理论的结果,画出与轴线垂直的截面上(包含两电极截面上)完整的等位线和电力线图,并根据此图说明该空间电极系统的等位面和电力线的三维空间分布特征(不包括两电极的上下两端的空间三维分布).

(4) 在测定 D 的过程中,使用 47kΩ 电阻及其并联开关应注意哪两点?

(5) 已知Ⓖ的偏转方向规律是:电流有Ⓖ的"+"极流入时,指针偏向顺时针方向.若Ⓖ逆时针偏转时,探针应往 A 还是 B 方向移动,才能使Ⓖ的偏转为零?

(6) 若导电纸为有缺口的扇形或扇形时,导电纸上电位线如何分布?

实验 3.5 *RLC* 串联电路的测量与分析

测量 *RLC* 常用的方法有电桥法、伏安法.用交流电压表、电流表和功率表测 *RLC* 的方法常称为"交流三表法".用三表法测量阻抗,由于电表本身的损耗,会产生较大的方法误差,测量的准确度不高,但这种测量方法可以在电路处于正常工作状态下进行,对于非线性阻抗元件(如铁心线圈)是一种重要的测量方法.

【实验目的】

(1) 理解并学会测量电阻器 R、电感器 L、电容器 C 及其组合的相位差 φ 和阻抗 Z 值.

(2) 验证余弦交流电路中"总电压有效值(合矢量)等于各分电压有效值(分矢量)之和".

(3) 学会用电压表、电流表、瓦特计测电感器的 L、r_L 和电容器的 C、r_C.

(4) 实验确定总电路的电功率 P_S 与各部分电路的分功率 P_i 间的关系.

【实验器材】

调压变压器、交流伏特计、交流电流计、白炽灯泡、功率计、电感器、电容器、闸刀开关.

【实验原理】

用图 3.5.1 所示的测量电路，直接测量此串联电路中的电阻 R、电感 L、电容 C、三者串联四种情况下的电压 U、电流 I、平均功率 P，然后运用测得值算出各个间接被测量.

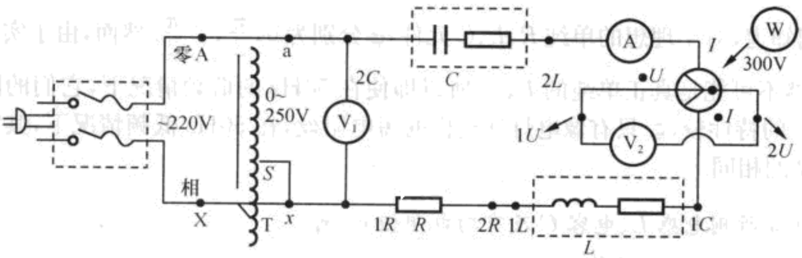


图 3.5.1

1. 计算测得的阻抗之模和辐角

1) 阻抗模的计算

根据交流电的欧姆定律，可得阻抗的复数式

$$\widetilde{Z}=\frac{\widetilde{U}}{\widetilde{I}} \tag{3.5.1}$$

阻抗模为

$$Z=\frac{U}{I} \tag{3.5.2}$$

对于被测的三个独立元件，其具体表达式分别为

$$R=\frac{U_R}{I} \tag{3.5.2a}$$

$$Z_{L_r}=\frac{U_{L_r}}{I} \tag{3.5.2b}$$

$$Z_{C_r}=\frac{U_{C_r}}{I} \tag{3.5.2c}$$

2）阻抗辐角的计算

若某一元件上的电压为U，通过该元件的电流为I，则元件消耗的功率（平均功率）P应由下式决定

$$P = UI\cos\varphi$$

式中，φ称为该元件阻抗的辐角（对于直流电而言$\varphi=0$），也称为该元件上的电压电流间的相位差. 由上式得

$$\varphi = \arccos\frac{P}{IU} \tag{3.5.3}$$

对被测三个元件

$$\varphi_R = \arccos\frac{P_R}{IU_R} \tag{3.5.3a}$$

$$\varphi_{L_r} = \arccos\frac{P_{L_r}}{IU_{L_r}} \tag{3.5.3b}$$

$$\varphi_{C_r} = -\arccos\frac{P_{C_r}}{IU_{C_r}} \tag{3.5.3c}$$

我们知道，对于理想的单纯R、L、C元件，φ分别为$0,\frac{\pi}{2},-\frac{\pi}{2}$. 然而，由于实际的电感器、电容器不可能是真正单纯的L、C，所以即使在50Hz的低频情况下，它们的阻抗特性也离L、C的特性较远. 只有像电灯泡这样的短电阻丝，在50Hz低频情况下，其特性才几乎和纯R的相同.

2. 计算所测电感L、电容C及有功电阻值r_L、r_C

1）电感器L、r_L的计算式

任何一个实际的电感器都会有损耗，因此应把电感器等效看成一个电感L和r_L的组合体. 这里把它看成一个L和r_L的串联体，r_L称为有功电阻（损耗电阻），它可由电功率损耗式算出，即$P=I^2r_L$，得

$$r_L = \frac{P}{I^2} \tag{3.5.4a}$$

对于视为串联体的电感器，其阻抗为

$$Z_{L_r} = \sqrt{r_L^2+(\omega L)^2}$$

解得

$$L = \frac{1}{\omega}\sqrt{Z_{L_r}^2 - r_L^2}$$

将(3.5.2b)式、(3.5.4a)式代入上式，得

$$L = \frac{1}{\omega}\sqrt{\left(\frac{U_{L_r}}{I}\right)^2 - \left(\frac{P}{I^2}\right)^2} \tag{3.5.4b}$$

式中，$\omega=2\pi f=2\pi\times 50=314(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$.

2）电容器C、r_C的计算式

实际电容器可看成C和r_C的串联

$$r_C = \frac{P}{I^2} \tag{3.5.4c}$$

$$C = \frac{1}{\omega\sqrt{\left(\frac{U_{C_r}}{I}\right)^2 - \left(\frac{P}{I^2}\right)^2}} \tag{3.5.4d}$$

3. 验证"总电压的有效值(合矢量)等于各分电压有效值(分矢量)的矢量和"理论

1) 该理论的数学推导

(1) 三角函数计算法.

设图 3.5.1 所示的串联电路中的瞬时电流为

$$i = \sqrt{2}I\cos\omega t \tag{3.5.5}$$

那么,图中纯电阻 $R'(=R+r_L+r_C)$ 及纯 L、C 上的电压瞬时值分别为

$$u_{R'} = \sqrt{2}U_{R'}\cos\omega t = \sqrt{2}R'I\cos\omega t \tag{3.5.5a}$$

$$u_L = \sqrt{2}U_L\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = \sqrt{2}\omega LI\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \tag{3.5.5b}$$

$$u_C = \sqrt{2}U_C\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \sqrt{2}\,\frac{1}{\omega C}I\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \tag{3.5.5c}$$

以上(3.5.5)各式中的 I、$U_{R'}$、U_L、U_C 均为有效值,而串联总电压的瞬时值为

$$u = u_{R'} + u_L + u_C = \sqrt{2}U_{R'}\cos\omega t + \sqrt{2}U_L\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + \sqrt{2}U_C\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

上式经计算可得

$$u = \sqrt{2}\sqrt{U_{R'}^2 + (U_L - U_C)^2}\cos\omega t$$

又因为应有

$$u = \sqrt{2}U\cos(\omega t + \varphi) \tag{3.5.5d}$$

比较上面两式可得

$$U = \sqrt{U_{R'}^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{R'^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}\,I \tag{3.5.5e}$$

计算可得

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R'}\right)$$

(2) 矢量法.

若在复数平面上用矢量图解法,则上述各量的关系则应如图 3.5.2 所示.

(3.5.5e)式和图 3.5.2 都表明,串联总电压 u 的有效值 U(合矢量)等于各分电压 $u_{R'}$、u_L、u_C 的有效值 $U_{R'}$、U_L、U_C(分矢量)之矢量和.

2) 实验验证法

一方面将测得的 $\tilde{U}_R$、$\tilde{U}_{L_r}$、$\tilde{U}_{C_r}$ 值用矢量图画在复数平面上,并用求矢量和的方法求出

它们的总电压 $\widetilde{U}_r$，如图 3.5.3 所示；另一方面，把测得的 U 也画在该坐标上(图中未画出)，将两者进行比较. 若它们的模之差值及 φ 之差值大小基本上属于测量误差范围之内，则实验证明了“总电压的有效值等于各分电压的有效值矢量和”是正确的.

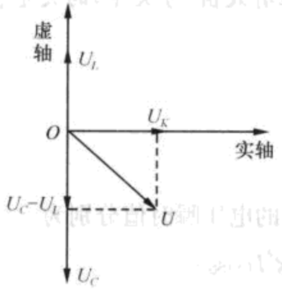


图 3.5.2

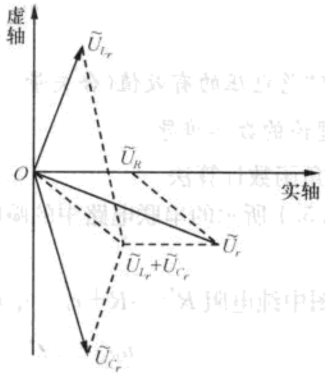


图 3.5.3

应该指出，上面采用的 $\widetilde{U}_R$、$\widetilde{U}_{L_r}$、$\widetilde{U}_{C_r}$ 的矢量与理论上讨论的 $\widetilde{U}_R$、$\widetilde{U}_L$、$\widetilde{U}_C$ 的矢量在实质上是相同的.

【实验内容】

1. $R+L+C$ 串联电路的测量分析

(1) 按照图 3.5.1 连接好电路，并把仪器调整在待测安全状态，包括：①变压器 T 输出电压调为 0；②所有的电表都选取最大的量程；③关断闸刀开关.

(2) 接通闸刀开关，用试电笔检验火、地线是否接对. 然后逐渐调整 T 的滑头，使输出电压由 0 值逐渐增大，将Ⓥ₁调整为 120V.

(3) 在 $U_1=120\text{V}$ 的条件下，测量三者串联 $R+L+C$ 的 I、U、P 值.

(4) 仍在三者串联且 $U_1=120\text{V}$ 的条件下，依次测量出电阻器、电感器、电容器上的 I、U、P 值，并记入表 3.5.1.

2. $R+L$ 串联电路的测量分析

实验步骤同上，数据录入表 3.5.2.

3. $L+C$ 串联电路的测量分析

实验步骤同上，数据录入表 3.5.3.

注意 为使得测量出的 I、U、P 值误差较小，Ⓐ、Ⓥ、Ⓦ其连接原则是：

(1) Ⓐ、Ⓦ的电流线圈应与被测电路串联.

(2) Ⓥ、Ⓦ的电压线圈应与被测电路并联.

(3) 在本实验中，在测量 R 的 I、U、P 时，Ⓦ采用电压线圈后向接法测量 P，Ⓐ采取外

接法测量 I,Ⓥ用内接法测量 U;其余应采用Ⓥ外接(Ⓐ内接)的伏安法测 I、U,Ⓦ采用电压线圈前向接法即电压线圈外接(电流线圈内接)的方式测量 P.

【数据处理】

1. $R+L+C$ 串联电路的测量分析

表 3.5.1

测量量	直接测量			间接测量			
测量电路	I/A	U/V	P/W	Z/Ω	$\varphi(^\circ)$	L 或 C	r_C 或 r_L
$R+L+C$							
R							
L						L=____	r_L=____
C						C=____	r_C=____

2. $R+L$ 串联电路的测量分析

表 3.5.2

测量量	直接测量			间接测量			
测量电路	I/A	U/V	P/W	Z/Ω	$\varphi(^\circ)$	L	r_L
$R+L$							
R							
L						L=____	r_L=____

3. $L+C$ 串联电路的测量分析

表 3.5.3

测量量	直接测量			间接测量			
测量电路	I/A	U/V	P/W	Z/Ω	$\varphi(^\circ)$	L 或 C	r_C 或 r_L
$L+C$							
L						L=____	r_L=____
C						C=____	r_C=____

【预习思考】

(1) 若不慎用已置 mA 挡或 Ω 挡的万用表去测量 100V 左右的交流电压,会发生什么后果?试说明其道理.

(2) 若误把Ⓐ或Ⓦ表的"$*I\sim$"与被测电路相并联,会产生什么后果?

【习题】

(1) 实际测得的电感器、电容器的特性(指阻抗模和辐角)与理想的 L、C 特性有什么差别?

(2) 余弦交流电总电压的有效值与各分电压的有效值的关系同直流电路的相应关系有何不同?为什么会有这种差别?

(3) 如果图 3.5.1 中$\textcircled{V_2}$的内阻抗并不远大于被测的三元件的阻抗，那么采用"需测某元件上的电压时便把它并联于该元件上"这种方法测量时，所得的电压值 U_R、U_L、U_C 会有什么样的明显误差？考虑此点，用万用表的交流挡 V 作$\textcircled{V_2}$比用电磁式电压表作$\textcircled{V_2}$是否好些？

(4) 能否得出镇流器中纯 L 的电压值？若能，试用公式或矢量图表示之.

【附录】

瓦特计简介

本实验所用瓦特计结构是电动式的. 它的内部有两类线圈：一类称为电流线圈，线圈较粗，是固定不动的；另一类称为电压线圈，导线较细，但匝数较多，套放在电流线圈的框内，可在框内转动. 当两线圈分别接入被测电路时，两线圈中电流的相互作用可使线圈偏转从而带动指针偏转，可动线圈所受转矩与有功功率成正比，从而示出被测电路上所消耗的平均电功率（亦称为有功功率）P 的值.

为了扩大电压线圈的电压量程 U_m，电压线圈串联有降压电阻. 两者构成的串联电路称为电压线圈电路，该电路量程大的，其降压电阻值当然较大. 电压线圈电路的总电阻值和电压表Ⓥ的内阻值相近.

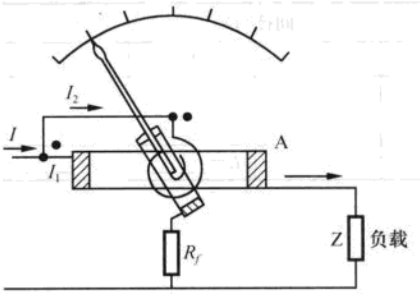


图 3.5.4

电流线圈设有串、并联电阻，它的直流电阻值和电流表Ⓐ的内阻值相近. 在有两个电流量程的瓦特计中，电流线圈由两个完全相同的线圈串（并）联组成. 并联时，其量程比串联时的大一倍.

瓦特计Ⓦ两线圈电路的四个接头与被测电路（其阻抗以 Z 表示）的连接法是电压线圈外接（电流线圈内接）的伏安法电路（这种形式，仪器的附加误差较小），如图 3.5.4 所示. 其中：

(1) 电流线圈（它的两接头"＊"、"A"，实际瓦特计标为"＊I"、"I"）必须与 Z 相串联.

(2) 电压线圈电路（＊-V）应于串联电路（即 Z 和＊-A 相串联的电路）相并联.

(3) 两线圈中的电流在正半周期间都应由"＊"端流入Ⓦ.

Ⓦ的量程由下式决定：

$$P_m = I_m U_m$$

式中，I_m、U_m 分别为实际选用的电流线圈、电压线圈电路的量程. 但是在交流功率测量中常遇到被测电路的功率因数很低的情况. 例如，测量日光灯消耗的功率、变压器的空载损耗、铁磁材料的损耗和电容器的介质损耗等. 由于普通功率表是按额定电压、额定电流和额定功率因数 $\cos\varphi=1$ 刻度的，用它们测量低功率因数的负载时，其指针偏转角将很小，由此导致读数误差大和测量误差大，所以要采用专门的低功率因数的功率表. 对于一些低功率因数的Ⓦ，其 $\cos\varphi<1$（而不是 $\cos\varphi=1$），此时其量程为

$$P_m = I_m U_m \cos\varphi$$

使用瓦特计时应注意不能超过其量程，这意味着不仅指针偏转（乘积值 $I_m U_m$）不允许

超过量程，而且实际的电流、电压值也都不允许超过其各自量程.

瓦特计的接法有电压线圈前接和后接两种方式，前者适用于高阻抗负载，后者适用于低阻抗负载. 本实验用到这两种接法.

实验 3.6 交流电路中功率和功率因数的测量

由于电感和电容都是储能元件，只有电阻通过焦耳热耗电，所以交流电路中一般不用公式 $P=IU$ 求得功率，而用公式 $P=IU\cos\varphi$ 来求得，用功率表来测量.

【实验目的】

(1) 了解日光灯的工作原理.

(2) 学习交流电功率和功率因数的测量方法.

(3) 了解如何提高交流电路的功率因数.

【实验器材】

日光灯组一套、电流表、电压表、瓦特表、闸刀开关.

【实验原理】

从 RLC 串联电路的测量和分析实验中知道：正弦交流电路中总电流的有效值等于各支路电流有效值的矢量和；总电压的有效值等于各段分电压有效值的矢量和；提高了功率因数值就提高了输配电的效率.

1. 日光灯电路的工作原理

1) 结构

日光灯由光管、启辉器 S、镇流器 L 组成. 光管内充有汞蒸气和氩气，两端有灯丝，内壁上涂有荧光粉，启辉器充有氖气，内有∩型电极，如图 3.6.1 所示. 镇流器是有铁心的电感线圈.

光管、镇流器、启辉器构成日光灯正常工作电路，如图 3.6.2 所示.

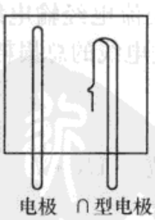


图 3.6.1

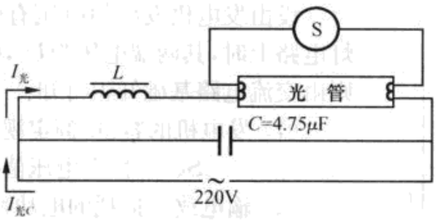


图 3.6.2

2) 发光原理

灯丝受热发射电子，在灯管两端电压的作用下，电子高速运动碰撞氩原子和汞原子，

使之电离，离子向电极运动，管内发生气体放电，管温提高，进一步加速气体电离放电．电子和原子碰撞时，使原子受激发出紫外线，紫外线使荧光粉发光．

3）日光灯的启动

接通电源的瞬间，由于灯管和启辉器还未导电，因而 220V 电压直接加在启辉器 S 的两个电极上，使氖气放电．弯曲电极受热伸展，电极接触．当 S 两极接触时，启辉器就成了一个接通了的开关．这时，一方面，接通了沿 L 经光管两端灯丝的电流，这个较大电流（对 40W 日光灯，此电流约为 0.7A）加热着光管的灯丝，使灯丝产生热电子发射；另一方面，由于 S 两极已经接触，因而在 S 中消失了被激导电，电极温度下降，电极还原形变．经零点几秒的冷却后，S 的两极便分开．

在 S 两极分开的瞬间，在光管两端便被加上一个远高于 220V 的瞬间高压．这个高压是 220V 的电压和 L 上的感应电动势（S 断开时在 L 上产生的感应电动势）的叠加．这个高压使灯管中的热电子加速，高速的电子使光管中的汞原子和氩原子电离，这种电离过程是连锁反应式的，于是光管就迅速导电而变亮．

光管导电后，两端电压便跌落至 108V 左右（40W 日光灯），这个电压值不能使 S 再被激导电，因而 S 停止工作．

当光管稳定导电且 S 停止工作时，光管就结束了启辉过程，进入稳定发光状态．

4）镇流器 L 的三个作用

（1）感抗 ωL 限定加热灯丝的电流值，以防止烧断灯丝．

（2）L 上产生瞬间感应电动势（高压），加在光管两端使光管启辉．

（3）在光管稳定导电发光期间，ωL 的降压作用使光管电压限制在其额定电压范围内（108±9）V．

依上所述，图 3.6.2 中光管、镇流器支路已完全能使日光灯正常工作，那还有什么必要把此支路与电容器 C 并联以构成日光灯的总电路呢？答案是：并联电容 C 仅仅是为了提高日光灯电路的功率因数．

2．功率因数的测量与提高

1）功率因数的定义及其由来

现以图 3.6.3 的简单电路为例说明．



图 3.6.3

设由发电机发出的电压有效值为 U 的交流电经输电线传至日光灯电路上时，其两端电压为 U_f，电流为 I，设输电线的总损耗电阻为 r_L，则由交流电路基础知识可知：

（1）发电机的容量（额定视在功率）

$$S_N = \text{额定电压值} \times \text{额定电流值} = U_N \cdot I_N \tag{3.6.1}$$

（2）输电线上损耗的电功率

$$P_{r_L} = I_L^2 r_L \tag{3.6.2}$$

（3）在日光灯电路上，其视在功率

$$S_f = U_f \cdot I_f \tag{3.6.3a}$$

无功功率

$$Q_f = U_f I_f \sin\varphi \tag{3.6.3b}$$

有功功率

$$P_f = U_f I_f \cos\varphi \tag{3.6.3c}$$

(4) 此日光灯电路的功率因数 $\cos\varphi$ 可由(3.6.3c)式、(3.6.3a)式得出. 即

$$\cos\varphi = \frac{P_f}{S_f} = \frac{P_f}{U_f I_f} \tag{3.6.4}$$

式中,φ 为 U_f 与 I_f 之间的相位差.

2) 功率因数的测量

用伏特计、安培计分别测出电路的 U_f 与 I_f 的值,同时用瓦特计测出 P_f,应用(3.6.4)式就可算出 $\cos\varphi$ 值.

3) 并联电容器可以提高电路的功率因数

在如图 3.6.2 所示的光管、镇流器支路上,功率因数不高(0.5～0.6),这是因为支路有较强的电感性,致使支路总电压 $U_{L光}$ 和支路电流 $I_光$ 之间有一个较大的相位差 $\varphi_光$,如图 3.6.4 所示.

如果把有适当电容量的电容器 C 与灯管、镇流器电路并联如图 3.6.2 所示,则并联后的总电路功率因数就可提高到 0.8～0.9. 这是因为,由于电容支路的电流 I_C 超前其电压 U_C 一个相位 φ_C ($\varphi_C \leqslant \pi/2$),于是并联电路的电压与并联电路的总电流 $I_{光C}$间的相位差就减小了(即 $|\varphi_{光C}| < |\varphi_光|$),从而使总电路的功率因数 $\cos\varphi_{光C}$值提高了,即

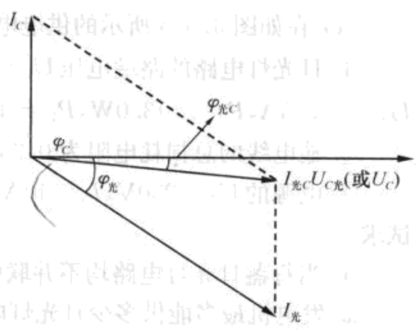


图 3.6.4

$$\cos\varphi_{光C} > \cos\varphi_光$$

4) 提高 $\cos\varphi$ 值的经济价值

仍以图 3.6.3 为例进行讨论.

发电机的设备有效利用率定义为

$$\eta_g = \frac{\text{用电电路的有功功率}}{\text{发电机的容量}} = \frac{P_f}{S_N} \tag{3.6.5}$$

输电线的输电效率定义为

$$\eta_L = \frac{\text{输电线净传输的有功电功率}}{\text{输电线净传输的有功功率} + \text{输电线上损耗电功率}} = \frac{P_f}{P_f + P_r} \tag{3.6.6}$$

显然,从发电、输配电系统的经济效益考虑,应该提高 η_g、η_L 的值.

【实验内容】

分别测出五种情况下的 I、U、P 值. 这五种情况是:日光灯管、镇流器、光管镇流器串联支路、电容器支路、并联(总)电路.

五种情况下的各个具体测量电路由学生自己画出.

【数据处理】

(1) 分别算出光管镇流器串联电路,日光灯并联(总)电路的 $\cos\varphi$ 值,并进行比较.

(2) 以总电压为基准,用矢量作图法求出并联总电流矢量,即 $I_{光C}=I_{光}+I_C$,然后把此($I_{光C}$)与实验测得($I_{光C}$)的相比较,以验证"总电流的有效值等于各分电流有效值的矢量和"的结论是否成立.

【预习思考】

(1) 启辉器的工作原理是什么?有不用启辉器的日光灯吗?其工作原理又是什么?

(2) 电路中并联电容 C 的作用是什么?对这样的电容有什么要求?

【习题】

(1) 在如图 3.6.3 所示的供电电路中,假设

① 日光灯电路的路端电压 $U_{\mathrm{f}}=220\mathrm{V}$ 时,每盏日光灯电路上的参数为 $I_{光}=0.40\mathrm{A}$, $I_{光C}=0.25\mathrm{A}$, $P_{光}=43.0\mathrm{W}$, $P_{\mathrm{L}}=6.5\mathrm{W}$, $P_C=0.5\mathrm{W}$

② 输电线的总损耗电阻为 0.25Ω;

③ 电源的 $U_{\mathrm{N}}=230\mathrm{V}$, $I_{\mathrm{N}}=40\mathrm{A}$.

试求

① 当每盏日光灯电路均不并联电容 C 时,

a. 发电机最多能供多少日光灯电路工作(以 n 表示)?

b. 此时 η_{g}、η_{L} 各为多少?

② 当它们都并联电容 C 时,其 n、η_{g}、η_{L} 又各为多少?

(2) 试用测得的有关数值作出如图 3.6.4 所示的 $I_{光}$、$I_{光C}$ 的矢量图(用坐标纸作),并以此图说明并联电容器能提高日光灯电路的功率因数的道理.

(3) 试用实验数据证明"正弦交流电总电流的有效值(合矢量)等于各分电流的有效值(分矢量)的矢量和",并计算其误差.

(4) 设每度电收费 0.56 元,运用习题 1 中的参数,使用 100 盏日光灯共计 20h,应缴电费多少元(1 度电 $=1\mathrm{kW}\cdot\mathrm{h}$)?

实验 3.7 交 流 电 桥

交流电桥是一种比较式仪器,在电测技术中占有重要地位.交流电桥的组合有很多种,比如常见的电容电桥、电感电桥,还有西林电桥、麦克斯韦(Maxwell)电桥、海氏(Hay)电桥、欧文(Owen)电桥、文氏(Wien)电桥、功率电桥等.交流电桥不仅具有直流电桥的结构简单、精密和通用特点,而且比直流电桥应用更广泛,不仅可以测量电阻,还可以测量电容、电感、互感、介质损耗和频率等.

【实验目的】

(1) 了解交流电桥的结构和平衡条件.

(2) 懂得交流电桥测量 C、L、R 等的原理,学会推导测量公式,并学会使用万能电桥.

(3) 掌握电桥的最佳测量方法.

(4) 能根据电桥实际的平衡指示灵敏度的相应测量精度,记录和处理实验结果.

【实验器材】

功率信号发生器,MF-20 晶体管万用表或晶体管毫伏表、交直流电阻箱、标准电容箱、电感器、待测电容电感、万能电桥.

【实验原理】

交流电桥的结构如图 3.7.1 所示,它和直流电桥在形式上完全相同,二者的不同点是:

(1) 交流电桥的桥臂是阻抗,而直流电桥的是电阻.

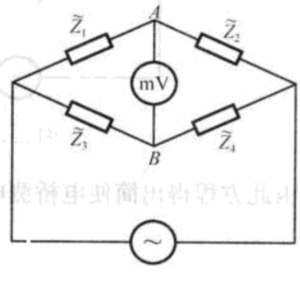


图 3.7.1

(2) 交流电桥的电源是正弦交流电源,而直流电桥的是直流电源.

(3) 交流电桥的平衡指示器能够指示微小交流电压,而直流电桥能指示微小的直流电压.

由于交流电桥桥臂上的电压是正弦电压,故它的平衡原理是

$$\widetilde{U}_{AB} = 0$$

平衡条件是

$$\widetilde{Z}_1\widetilde{Z}_4 = \widetilde{Z}_2\widetilde{Z}_3 \tag{3.7.1}$$

即电桥两两相对桥臂的复阻抗乘积相等.

由于 $\widetilde{Z}=Ze^{j\varphi}$,故上式应为

$$Z_1Z_4e^{j(\varphi_1+\varphi_4)} = Z_2Z_3e^{j(\varphi_2+\varphi_3)}$$

欲使此等式两边相等,必须使其模和辐角分别相等,即

$$Z_1Z_4 = Z_2Z_3 \tag{3.7.2}$$

$$\varphi_1+\varphi_4 = \varphi_2+\varphi_3 \tag{3.7.3}$$

这就是交流电桥的平衡条件,即只有当交流电桥两两相对桥臂的阻抗之模的乘积相等,且其辐角的和也相等时,该电桥才平衡.

1. 简便电桥测电感(或电容)

1) 测量原理

图 3.7.2 是测量电感的一种简便电桥,其中:L_x 是待测电感器,r_{L_x} 是它的串联等效损耗电阻;L_S、r_{L_S} 是标准电感器的电感量及等效损耗电阻;R_3 是直流电阻箱,R_2 和 R_4 是交流电阻箱.

该电桥的平衡条件由(3.7.1)式具体化为

$$(r_{L_x}+\mathrm{j}\omega L_x)R_4=R_2(R_3+r_{L_S}+\mathrm{j}\omega L_S) \tag{3.7.4}$$

展开上式，令其实部和虚部相等，可得简便电桥测电感的电桥平衡条件

$$\begin{cases} L_x=\dfrac{R_2}{R_4}L_S & (3.7.5a)\\ r_{L_x}=\dfrac{R_2}{R_4}(R_3+r_{L_S}) & (3.7.5b)\end{cases}$$

采用同样的方法，可推出图 3.7.3 简便电桥测电容的电桥平衡具体公式

$$\left(r_{C_x}-\mathrm{j}\,\frac{1}{\omega C_x}\right)R_4=R_2\left(R_3+r_{C_S}-\mathrm{j}\,\frac{1}{\omega C_S}\right) \tag{3.7.6}$$

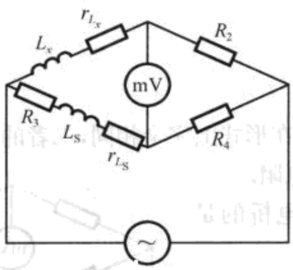


图 3.7.2

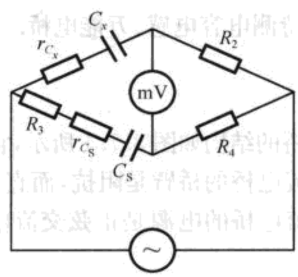


图 3.7.3

由此方程得出简便电桥测电容的平衡条件

$$\begin{cases} C_x=\dfrac{R_4}{R_2}C_S & (3.7.7a)\\ r_{C_x}=\dfrac{R_2}{R_4}(R_3+r_{C_S}) & (3.7.7b)\end{cases}$$

式中，r_{C_S} 为标准电容自身的串联等效损耗电阻，由于损耗电阻的存在，使得当交流电流通过电容时，电容两端的电压和流过的电流相位差不是 $\pi/2$，而是 $\pi/2-\delta$，其中 δ 是待测电容的损耗角. 损耗角的正切 $\tan\delta=\omega C_x R_x$ 成为损耗，电容的损耗越大，其质量越差. 因为损耗电阻值较小，故在本实验中忽略不计.

(3.7.7a)式和(3.7.7b)式既是图 3.7.3 电桥的平衡条件，又是间接测量(计算)C_x、r_{C_x} 的公式. 由此得出测量 C_x、r_{C_x} 的原理为：调节 R_2、R_4、C_s、R_3 的值，使 U_{AB} 的值逐渐减小，直至为最小值(理论上 $U_{AB}=0$，但实际上由于各种干扰的存在让 U_{AB} 小于某个值即可，比如≤1.5mV).

2) 值得注意的问题

需要指出的是，在交流电桥平衡调节过程中要注意以下几个问题：

(1) 对供桥电源的选择问题. 从上面的平衡调节可以看出，这些平衡条件是只针对一个频率 ω 的情况下推出的. 当供桥电源有多个频率成分时，就得不到平衡条件，因此交流电桥对供桥电源要求具有良好的电压波形和频率稳定性.

(2) 调节参量的选择问题. 由于交流电桥的平衡必须同时满足两个条件，因此在桥臂调节参量中至少要有两个是可以调节的，其余参量在电桥调节过程中固定不变(称为固定

参量）. 实验中如何选择调节参量是关系到电桥能否收敛和收敛快慢的问题. 显然两个调节参量不能只出现在一个平衡方程式中，否则另一个平衡方程式就永远满足不了；如果调节参量同时出现在两个平衡方程式中，由于调节时对两个平衡条件都有影响，又须反复调节多次才能使两个平衡调节同时都能满足. 因此若两个调节参量分别出现在两个平衡方程式中，从理论上讲两次调节电桥就可达到平衡. 因此本实验中就选择 R_3、C_S 作为调节参量.

(3) 各桥臂参量的初值设置问题. 欲使电桥快速平衡，开始应设法估计待测量的数值，并根据平衡条件和测量精度要求，选定固定参量的数值和调节参量的初值，使电桥一开始就接近平衡点.

(4) 调节顺序的问题. 对于两个调节参量，就涉及先调哪一个的问题. 由于各桥臂参量对电桥平衡起的作用不同，调节时要分主次，先调节对平衡起主导作用的参量.

(5) 影响测量误差的参数问题. 如各元件之间的互感影响，互感电阻的残余电抗、临近交流电路对电桥的感应作用，泄露电阻以及元件之间、元件与地之间的分布电容等，因此要尽量减小这些干扰因素.

3) 电桥的平衡指示灵敏度 S

由实验可知：当电桥调节到某种程度的平衡后，若调整某一桥臂的 $\pm\Delta Z$ 值，使 U_{AB} 的变量 $\pm\Delta U_{AB}$ 能被平衡指示器 $\mathrm{m}\widetilde{\mathrm{V}}$ 显示出 $\pm\Delta n$，且此 $\pm\Delta n$ 刚好能被观测者察觉出，我们定义 S 为

$$S=\frac{1}{\Delta Z/Z}$$

由定义可知，提高 S 值就能提高直接测量量 Z 的精度，因而也就能提高间接测量量的精度. 下面给出能增大 S 的四种途径：

(1) 提高 $\mathrm{m}\widetilde{\mathrm{V}}$ 的灵敏度，或者减小 $\mathrm{m}\widetilde{\mathrm{V}}$ 的量程；

(2) 增大电桥的供电电压；

(3) 四个桥臂的复阻抗彼此相等时，S 出现极大值；

(4) 尽可能减小 A、B 两点之间的干扰电压值.

2. 麦克斯韦电桥测电感

图 3.7.4 所示为麦克斯韦电桥，用以电容为标准测未知电感及其品质因数，或以电感为标准测未知电容的量值，其中 L_x 是待测电感器，r_{L_x} 是它的串联等效损耗电阻，C_S 为标准电容箱，其自身的损耗电阻 r_{C_S} 忽略不计.

该电桥的平衡条件为

$$R_1R_4=(r_{L_x}+\mathrm{j}\omega L_x)\frac{1}{1/R_3+\mathrm{j}\omega C_S}$$

从而解得

$$\begin{cases}L_x=R_1R_4C_S & (3.7.8\text{a})\\ r_{L_x}=R_1R_4/R_3 & (3.7.8\text{b})\end{cases}$$

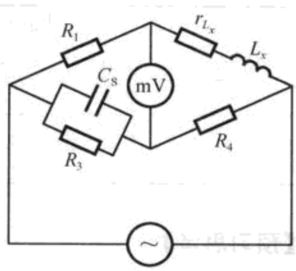


图 3.7.4

在解的过程中要求 $Q^2=\left(\frac{\omega L_S}{r_{L_x}}\right)^2 \gg 1$

【实验内容】

1. 简便电桥测电容 C_x

(1) 按照图 3.7.3 接好电路图，并设置好各个参量的初始值.

(2) 将指零仪放在合适的量程.

(3) 设置信号源 $f=1000\text{Hz}$，输出电压为 $3.0U_{RMS}$，并保持恒定.

(4) "逐位扫值"地调节 C_S 值，使指零仪指示值 U_{AB} 逐渐达到极小值，数据录入表 3.7.1.

(5) 逐步增大 R_3 的值(注意电阻箱接线柱的选取)，使 U_{AB} 出现极小值.

(6) 反复调节 C_S 和 R_3，使 $U_{AB}<1.5\text{mV}$，此时可以认为电桥处于平衡状态.

2. 麦克斯韦电桥测电感 L_x

实验步骤仿照简便电桥测电容的方法. 数据录入表 3.7.2.

【数据处理】

1. 简便电桥测电容 C_x

表 3.7.1

测电容 C_x 及 r_{C_x}　$f=1000\text{Hz}$，$U_{RMS}=3.0\text{V}$，$U_{AB}<1.5\text{mV}$						
R_2/Ω	R_1/Ω	$C_S/\mu\text{F}$	$C_x=\frac{R_1\cdot C_S}{R_2}/\mu\text{F}$	R_3/Ω	$r_{C_x}=\frac{R_2(R_3+r_{C_S})}{R_1}/\Omega$	U_{AB}/mV
100	100					
100	200					
100	300					

2. 麦克斯韦电桥测电感 L_x

表 3.7.2

测电感 L_x 及 r_{L_x}　$f=1000\text{Hz}$，$U_{RMS}=3.0\text{V}$，$U_{AB}<1.5\text{mV}$						
R_1/Ω	R_4/Ω	$C_S/\mu\text{F}$	$L_x=R_1\cdot R_4\cdot C_S/(\text{mH})$	R_3/Ω	$r_{L_x}=R_1R_4/R_3/(\Omega)$	U_{AB}/mV
400	500					
1000	200					
500	100					

【预习思考】

(1) 交流电桥在平衡原理、所用仪器及测量方法等方面与直流电桥有何异同?

(2) 按照图 3.7.4 测电感的实验中,R_3、R_4 应如何选取?过大或过小后果如何?

【习题】

(1) 当电桥平衡时,若把电源在电路中的位置与平衡指零仪的位置互换,电桥是否仍能平衡?计算式是否仍能成立?

(2) 在图 3.7.5 的几种交流电桥中,请推导出哪些能调至平衡?(考虑损耗电阻的存在)

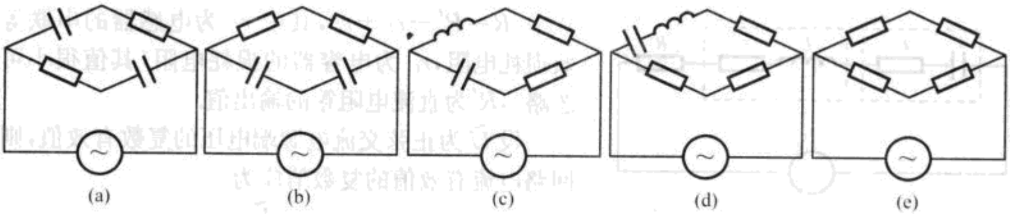


图 3.7.5

(3) 在图 3.7.3 中,若要使 C_x 的测量精度提高,则应________(提高、降低)此桥路的平衡指示灵敏度.为此,①应________(增大、减小)平衡指零仪的量程;②应适当________(提高、减小)供源电压的大小;③应设法安排四桥臂阻抗________(接近相等、相隔较远)的最佳平衡桥臂条件.

(4) 试说明图 3.7.6 交流电桥的一个应用——消侧音电路的基本原理吗?

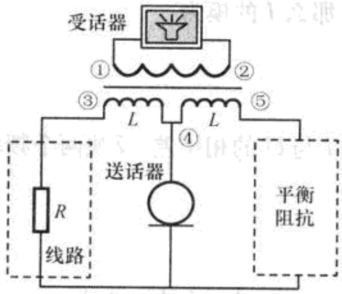


图 3.7.6

实验 3.8 交流电路的谐振

交流电路的谐振有很多用途,可用于测量电感、电容、频率,还可用于选频、陷波、调谐放大、作振荡器和频率补偿等.

【实验目的】

(1) 观察交流电路的串并联谐振现象,理解其实质,明确谐振条件和提高 Q 值的途径.

(2) 学会测 I-ω 曲线.

(3) 学会用谐振法测电容.

(4) 学会使用信号发生器、晶体管毫伏表和并理解它们的"共地"问题等.

【实验器材】

信号发生器、晶体管毫伏表、直流电阻箱、标准电感器、标准电容器.

3.8.1　LCR 串联电路的谐振观测和分析

【实验原理】

在如图 3.8.1 所示的 LCR 串联电路中，LCR 的串联总阻抗的复数为

$$\tilde{Z} = R + \mathrm{j}\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

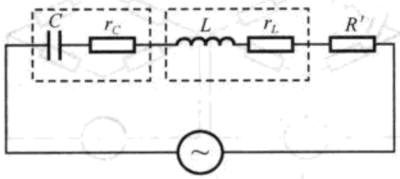


图 3.8.1

式中，$R=R'+r_L+r_C$，其中 r_L 为电感器的串联等效损耗电阻，r_C 为电容器的损耗电阻（其值很小可忽略），R' 为直流电阻箱的输出值.

设 $\tilde{U}$ 为正弦交流电源端电压的复数有效值，则回路电流有效值的复数值应为

$$\tilde{I} = \frac{\tilde{U}}{\tilde{Z}}$$

那么 $\tilde{I}$ 的模为

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \tag{3.8.1}$$

I 与 U 的相位差（反映两个频率相同的交流电任何时刻的状态之间的差别）为

$$\varphi = \arctan \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \tag{3.8.2}$$

1. I-ω 和 ϕ-ω 曲线

由(3.8.1)式可知，当 U 保持一定是，I 随圆频率 ω 的变化而变化，其函数曲线如图 3.8.2 所示. 我们把 I-ω 曲线称为 I 的幅频特性曲线或谐振曲线，同样把(3.8.2)式的曲线 φ-ω 称为相频特性曲线，如图 3.8.3 所示.

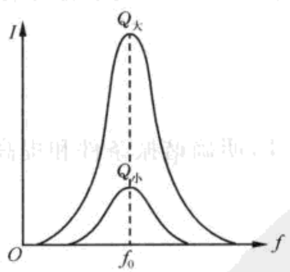


图 3.8.2

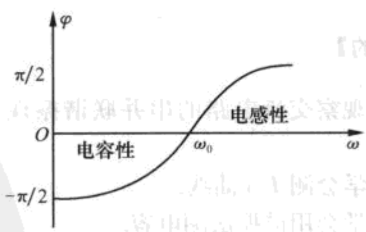


图 3.8.3

2. 谐振及谐振时的各种关系

当电路参数满足回路的感抗和容抗相互抵消时，即当满足条件

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$$

时，总回路的电抗为0，相位差 $\varphi=0$，此时 I 出现极大值. 我们把电路的这种状态（电源信号的 ω 与电路的 L、C 值三者正好"和谐"）称为串联谐振. 串联谐振时有下列特性：

（1）谐振频率. 由 $\omega L-\frac{1}{\omega C}=0$ 可得

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

把此时的 ω 记为 ω_0，则谐振频率相应记为

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{3.8.3}$$

（2）谐振时的总阻抗为 $Z_{\min}=R$，即此时总阻抗只有电阻，是回路阻抗的极小值.

（3）谐振时的电流为 $I_{\max}=\frac{U}{Z_{\min}}=\frac{U}{R}$，它是 I 的极大值（U 保持恒定）.

（4）谐振电路的 Q 值.

Q 值在电路中代表着谐振电路的品质因素，它定义为谐振电路中任一电抗器的谐振电抗与总电阻的比值，即

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{\frac{1}{\omega C}}{R} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} \tag{3.8.4}$$

（5）谐振时的电压.

由欧姆定律可知，谐振时电阻器、电感器、电容器上的电压分别为

$$U_{R'} = (U_{R'})_{\max} = I_{\max}\cdot R' = \frac{U}{R}R' \tag{3.8.5}$$

$$U_{L,r_L} = (U_{L,r_L})_{\max} = I_{\max}\cdot\sqrt{r_L^2+(\omega L)^2} \approx I_{\max}\cdot\omega L = \frac{U}{R}\omega L = QU \tag{3.8.6}$$

（一般情况下 $r_L^2 \ll (\omega L)^2$）

$$U_{C,r_C} = (U_{C,r_C})_{\max} = I_{\max}\cdot\sqrt{r_C^2+\left(-\frac{1}{\omega C}\right)^2} \approx I_{\max}\cdot\frac{1}{\omega C} = \frac{U}{R}\,\frac{1}{\omega C} = QU \tag{3.8.7}$$

由于谐振时 $Q\gg1$，因此 $U_C=U_L=QU\gg U$，可以看出谐振有电压放大功能，故称串联谐振为电压谐振.

3. Q 值的意义和提高 Q 值的途径

Q 被称为谐振电路的品质因数，它是由电路的固有特性决定的，是标志和衡量电路性能优劣的重要参数. 设电流为最大值 $I_{\max}$ 的 $1/\sqrt{2}$ 时所对应的频率为 f_1、f_2，则称 $\Delta f=f_2-f_1$ 为通频带宽度，简称带宽. Q 与 Δf 之间的关系为

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} = \frac{f_0}{f_2-f_1} \tag{3.8.8}$$

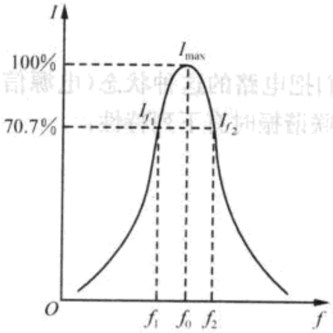


图 3.8.4

串联谐振电路的 Q 值表明三方面的意义：

(1) 表明谐振时电抗器件上的电压为总电压的倍数.

(2) 表明谐振电路允许不同频率信号通过时选择性的好坏程度(图 3.8.4).

由(3.8.8)式知，要使谐振电路的选择性好(即增大 Q)，就尽量减小通频带宽度 Δf.

(3) 表明谐振电路储存能量的效率. Q 值越大，其效率越高，即较小的通频带储存较大的能量.

由 Q 值所表明的意义可以看出，在一般情况下，提高电路 Q 值是有实际价值的.

另外由(3.8.4)式可知，一旦电路参数 L、C、R 值确定后，电路的 Q 值也就随之确定了. 该式还指明了提高 Q 值的三种途径.

【实验内容】

1. 测 $R'=30\Omega$ 时的 I-f 幅频特性曲线

采用测已知电阻 R'上的电压 $U_{R'}$ 的方法来测量 I. 测曲线过程中，由于信号源㊀的内部输出阻抗不能忽略，其输出端电压随负载阻抗变化而变化，因此，每选好一个频率 f 时，都必须调节㊀的电压调节旋钮“输出调节”，使输出电压 U 保持一定. 本实验取 $U\equiv 3.0U_{RMS}\approx 8.5U_{pp}$，$L=0.08\text{H}$，$C=0.0032\mu\text{F}$.

具体步骤如下：

(1) 先根据给定的 L 和 C 算出理论谐振频率 f_{0i}，然后在此频率左右微调，同时观察 R'两端的电压变化情况，当 R'上的电压达到最大值时，记下此时信号发生器的输出频率为实验谐振频率 f_{op}，同时记下 R'上对应的最大电压值 $(U_{R'})_{max}$.

(2) 根据 $U_{f_1}=U_{f_2}=\frac{\sqrt{2}}{2}(U_{R'})_{max}$ 的定义式，分别找出 f_1、f_2 的实验值.

(3) 测量 $f<f_1$ 区间的曲线：测出 f_1 分别减去 0.1kHz，0.25kHz，0.50kHz，1.0kHz，2.0kHz，5.0kHz 对应频率的电压值.

(4) 测量 $f>f_2$ 区间的曲线：测出 f_2 分别加上 0.1kHz，0.25kHz，0.50kHz，1.0kHz，2.0kHz，5.0kHz 对应频率的电压值.

(5) 按照图示法的要求，在坐标纸上做出 I-f 特性曲线.

2. 观测 Q 值和 R 的关系

(1) 测量 $R'=30\Omega$ 时的 U_C，并计算 Q 值.

将 m$\tilde{V}$ 改接为测 U_C 的位置(注意：此时要交换总负载的两端线在㊀输出端上的位置，以便使 m$\tilde{V}$ 的接地端“⊥”仍然与㊀的“⊥”同电位). 在 f_{op}附近调节信号源的 f，使出现极大值 $(U_C)_{max}$，记下此时的频率为 f_{oC}，并代入公式 $Q\approx(U_C)_{max}/U$ 计算出 Q 值.

(2) 测量 $R'=130\Omega$ 时的 U_C，并计算 Q 值.

(3) 测量 $R'=0\Omega$ 时的 U_C，并计算 Q 值.

(4) 找出 $Q\leqslant 1$ 时的 R' 的范围(提示：将信号源的频率固定在某一个 f_{oC}，然后调节 R' 使得 $U_C=U$).

3. 观测 f_o、Q 与 C 的关系

L 值不变，在 $R'=30\Omega$ 的条件下将 C 值增大一倍，即 $C=0.0064\mu F$，然后测出相应的 f_o、Q 值，并与 2 测得的相应值比较.

3.8.2 RLC 并联谐振的观测和分析

【实验原理】

在如图 3.8.5 所示的电感电容并联谐振电路中，其谐振电路总阻抗为

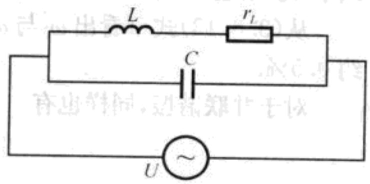


图 3.8.5

$$\frac{1}{\tilde{Z}}=\frac{1}{r_L+\mathrm{j}\omega L}+\frac{1}{\frac{1}{\mathrm{j}\omega C}}$$

$$\tilde{Z}=\frac{(r_L+\mathrm{j}\omega L)\left(\frac{1}{\mathrm{j}\omega C}\right)}{r_L+\mathrm{j}\left(\omega L-\frac{1}{\omega C}\right)} \tag{3.8.9}$$

1. Z-ω 曲线和 ϕ-ω 曲线

因 $Q=\frac{\omega L}{r_L}\gg 1$，所以在谐振频率 f_o 附近应有 $\omega L\gg r_L$，故

$$\tilde{Z}\approx\frac{L/C}{r_L+\mathrm{j}\left(\omega L-\frac{1}{\omega C}\right)}$$

于是 $\tilde{Z}$ 的模及相角分别为

$$Z\approx\frac{L/C}{\sqrt{r_L^2+\left(\omega L-\frac{1}{\omega C}\right)^2}} \tag{3.8.10}$$

$$\varphi\approx-\arctan\frac{\omega L-\frac{1}{\omega C}}{r_L} \tag{3.8.11}$$

比较(3.8.10)式和(3.8.1)式可知，在 f_o 附近，并联谐振电路的阻抗模随 f 变化的函数曲线形式和串联谐振电路的很相似，而并联和串联的 φ-f 曲线也很相似，只有一个正负号差别，因而曲线以横轴 f 为对称轴对称分布.

2. 并联谐振及谐振时的种种关系

同串联谐振一样，当并联电路的总阻抗呈现纯电阻(即电抗部分为 0，$\varphi=0$)时的电路

状态称为并联谐振. 并联谐振电路有如下一些特性:

1) 谐振频率和 Q 值

由(3.8.10)式和(3.8.11)式知,当 $\omega L-\frac{1}{\omega C}=0$ 时出现并联谐振. 由此可知,同样的 L、C 所组成的串联电路和并联电路,其并联谐振频率近似等于串联谐振频率.

并联谐振的准确谐振频率可从(3.8.9)式推导出,当 $\tilde{Z}$ 的虚部为 0 时,有

$$\omega_0'=\sqrt{\frac{1}{LC}-\frac{r_L^2}{L^2}} \tag{3.8.12}$$

ω_0' 与串联谐振圆频率的 ω_0 间的关系为

$$\omega_0'=\omega_0\sqrt{1-\frac{1}{Q^2}} \tag{3.8.13}$$

式中,Q 的定义及表达式和串联谐振时的一样.

从(3.8.13)式可看出 ω_0' 与 ω_0 近似相等的程度. 例如,当 $Q=10$ 时,算得 ω_0' 比 ω_0 仅小约 0.5%.

对于并联谐振,同样也有

$$Q=\frac{f_0}{\Delta f}=\frac{f_0}{f_2-f_1}$$

2) 谐振时的总阻抗

$$Z_{\omega_0'}'=\frac{L}{r_L C}=Q^2 r_L \tag{3.8.14}$$

3) 谐振时的电流

在 U 一定的情况下,由于谐振时的总阻抗是极大值,所以谐振时整个回路总电流是极小值,这时它与 L、C 分支回路电流的关系为

$$QI=I_L=I_C \tag{3.8.15}$$

可以看出,当并联谐振时,支路电流是总回路电流的 Q 倍,故并联谐振又可称为电流谐振.

【实验内容】

所用电路如图 3.8.6 所示. 图中 $R'=5\text{k}\Omega$,$U_0=4.0U_{\text{RMS}}$.

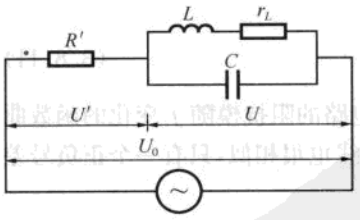


图 3.8.6

1) 测量并做出 I-f 曲线

其具体做法和步骤自行思考. 提示:谐振时 R' 上的电压 U' 出现极小值.

2) 测 Q 值

由于 $Q\approx\frac{I_C}{I}=\frac{U\Big/\frac{1}{\omega_0 C}}{U_{\min}'/R'}=\frac{R'U}{U_{\min}'\omega_0 C}$,故调节 ω 使 R' 两端的电压 U' 正好为极小值 $U_{\min}'$ 时(此时 $\omega=\omega_0$),代入各值便可计算出 Q 值.

【数据处理】

1. 串联谐振电路的 I-f 曲线

f_{0i}=______　f_{op}=______　$(U_{R'})_{max}$=______　f_1=______　f_2=______

$f<f_1$/Hz	f_1-100	f_1-250	f_1-500	f_1-1000	f_1-2000	f_1-5000
$U_{R'}$/V						
$f>f_2$/Hz	f_2+100	f_2+250	f_2+500	f_2+1000	f_2+2000	f_2+5000
$U_{R'}$/V						

2. 串联谐振时 Q 与 $R(R')$ 的关系

R'/Ω	0	30	130
$(U_C)_{max}$/V			
f_{0C}			

【预习思考】

(1) 什么是相位差？总阻抗表达式中的复数 j 代表什么含义？

(2) 交流电的"共地"是什么含义？为什么要同电位？

(3) 叙述并解释：当电源频率高于或低于电路的谐振频率时，LCR 串联电路和并联电路分别呈现什么性质(电容性还是电感性)？

(4) 现有一含有多种频率成分的电源 u_i，其内阻为 r，想利用串联谐振原理去掉某 f_o 频率成分(陷波)，如图 3.8.7 所示，问 LC 的数值应满足什么要求？r 的数值适当大些还是小些对这种陷波作用有利？

(5) 现有一含有多种频率成分的电源 u_i，其内阻为 r，想利用并联谐振原理取出某 f_o 频率成分(陷波)，如图 3.8.8 所示，问 LC 的数值应满足什么要求？r 的数值适当大些还是小些对这种陷波作用有利？

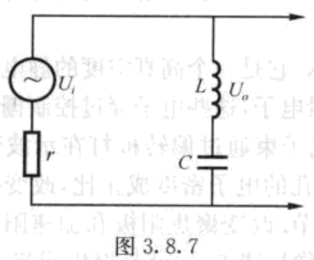


图 3.8.7

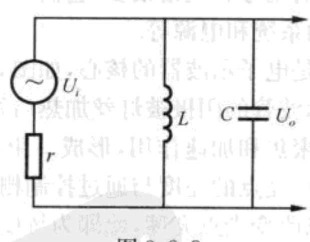


图 3.8.8

【习题】

(1) 据实验 3.8.1 内容 1 中第 1 步的测得值，运用(3.8.5)式算出 R 和 r_L+r_C 的值.

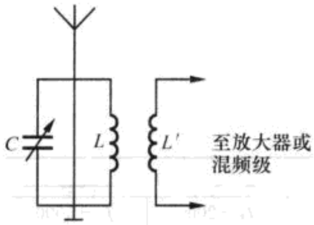


图 3.8.9

(2) LC(无 R')电路串联谐振时,其电路的总阻抗呈现________值,Z_{ω_0} = ________,因而电路的电流呈现最________值,出现 $U_C=U_L=QU$ 的电________谐振现象.

(3) 如图 3.8.9 所示,接收机的 LC 输入回路是________联谐振回路. 当调节回路的________值,使回路的固有频率 f_0 正好等于欲接收信号的频率 f 时,在 L 中的此信号电流出现________值,因而耦合到副线圈 L' 上时该信号电压出现________值.

实验 3.9　示波器的原理及应用

电子示波器是用来直接显示、观察和测量电压波形及其参数的电子仪器. 一切能转换为电压的电学量(如电流、电阻等)和非电学量(如温度、压力、磁场、光强等),它们的动态过程均可用示波器来观察和测量. 现代示波器的频率响应可从直流至 10^9 Hz;它可观察连续信号,也能捕捉到单个的快速脉冲信号并将其储存起来,定格在屏幕上供分析研究;它还能在屏上测量电压、时间、频率等各种参数. 示波器是用途极为广泛的一种通用现代测量工具. 本实验主要是学习示波器的使用,利用示波器对电信号的波形进行观察,并对电信号的变化进行测量.

【实验目的】

(1) 了解示波器的主要组成部分、工作原理及使用方法.

(2) 会正确使用示波器观察波形,并测量信号和观测李萨如(Lissajous)图形等.

【实验器材】

CS-4125 双踪示波器、信号源.

【实验原理】

示波器的型号和规格很多,它们一般包括图 3.9.1 所示的基本组成部分:示波管、Y 轴系统、X 轴系统和电源等.

示波管是电子示波器的核心,如图 3.9.2 所示. 它是一个高真空度的静电控制的电子束玻璃管. 示波管的阴极被灯丝加热后发射出大量电子,这些电子穿过控制栅后,受第一、第二阳极的聚焦和加速作用,形成一束电子束,电子束通过偏转板打在示波管的荧光屏上,形成亮点. 亮点的亮度与通过控制栅极中心小孔的电子密度成正比,改变控制栅极的电压,就可以改变光点亮度,此即为辉度(亮度)调节. 改变聚焦阳极和加速阳极的电压可以影响电子束的聚焦程度,使光点的直径最小,图像最清晰,这就是聚焦调节. 亮点在荧光屏上的位移与偏转板上所加的电压成正比,因此,亮点的运动轨迹描绘出纵偏和横偏信号合成运动规律的图像.

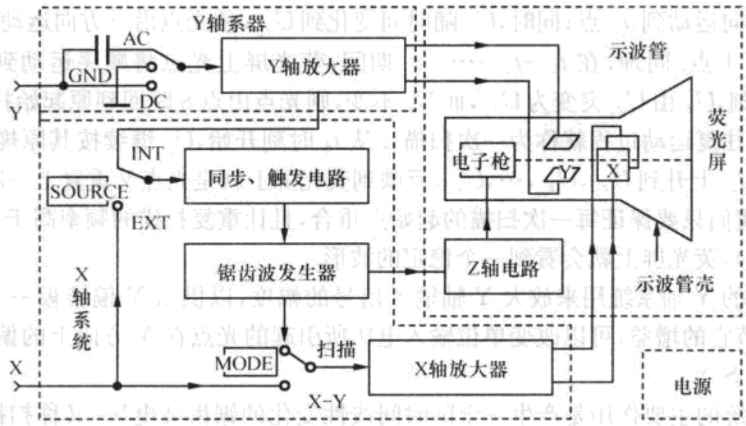


图 3.9.1

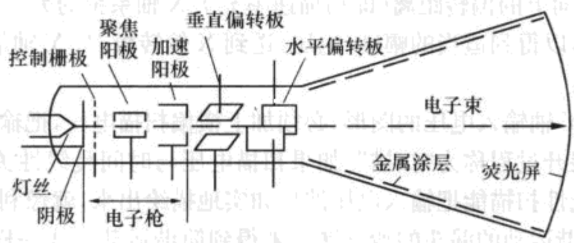


图 3.9.2

如果在 Y(或垂直)偏转板上加上电压,则两极板间就会形成一个电场.当电子束运动经过两极板中间时,由于受电场力的作用,其运动方向将发生改变,打到荧光屏上产生的光点也将发生 Y 方向的位移.改变 Y 偏转板的极间电压,光点的位移量也就随之改变.如果将被测信号电压加到 Y 偏转板上,则光点在 Y 方向的位移也就随被测信号电压的变化而变化.

X(或水平)偏转板作用原理与 Y 偏转板相同,所不同的只是一般在 X 偏转板上加上一个随时间线性变化的锯齿波电压,让光点在 X 方向上的位移与时间成正比.

依靠这两对偏转板,电子束可以到达荧光屏的任一位置.因此,当示波管的 X、Y 偏转板上同时加上上述电压时,光点在两个方向上位移的合成就将 Y 轴信号随时间变化的规律在荧光屏上显示出来了.

如图 3.9.3 所示,假设加在 Y 偏转板上的信号是正弦电压,X 偏转板上加的是锯齿波电压,且 $T_x=2T_y$,则在 t_0 时刻,$U_x=U_y=0$,光点在荧光屏上 O 点(也称起始扫描点);

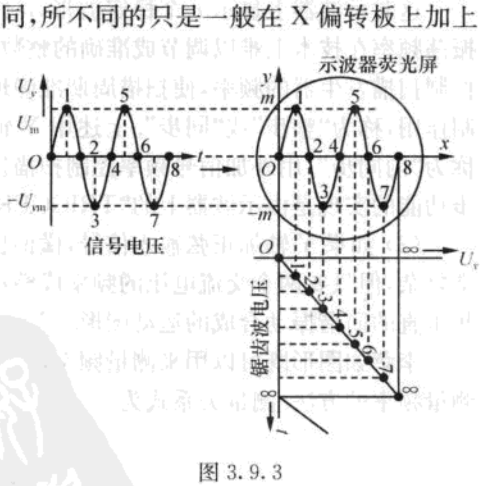


图 3.9.3

在 t_0～t_1 期间,U_x 由 U_{x_0} 上升到 U_{x_1},光

点沿水平方向运动到 x_1 点；同时，U_y 随时间变化到 U_{y_m}，使光点沿 y 方向运动到 y_m，二者合成运动到 1 点. 同理，在 t_1—t_2—⋯—t_8 期间，荧光屏上光点将顺序运动到 2，3，⋯，8 点. 在 t_8 时刻，U_x 由 U_{x_8} 突变为 U_{x_0}，而 U_y 不变，则光点由点 8 跳回到原起始扫描点 O（光点这样一个往复运动过程就称为一次扫描）. 从 t_8 时刻开始，U_y 继续按其原规律变化，而 U_x 重新由 U_{x_0} 上升到 U_{x_1}，U_{x_2}，⋯，U_{x_8}，反映到荧光屏上就是光点又重复上一次的扫描.

这样，我们只要保证每一次扫描的起始点重合，且让重复扫描的频率高于人眼的分辨率（约 25Hz），荧光屏上就会看到一个稳定的波形.

示波器的 Y 轴系统用来放大 Y 轴输入信号的幅度，以供给 Y 偏转板一个合适的工作电压. 调节它的增益，可以改变单位输入电压所引起的光点在 Y 方向上的偏转距离（即 Y 轴灵敏度 S_y）.

X 轴系统的主要作用是产生一个随时间线性变化的锯齿波电压（又称扫描电压），经放大后加到 X 偏转板，形成一条时间轴线. 调节扫描电压的斜率（$\Delta u/\Delta t$），可以改变单位时间内光点在 X 方向上的偏转距离（即扫描速率 v_x）. X 轴系统的另一个作用是作为 X 外输入信号的放大器，以得到适当的幅度（电压）送到 X 偏转板，与 Y 轴信号垂直合成.

从上所述可见：

（1）要想得到 Y 轴输入电压的图形，必须加上横偏扫描电压，把输入信号电压的垂直振动“展开”，这个展开过程称为“扫描”. 如果扫描电压与时间呈线性关系（锯齿波扫描），则称为线性扫描. 线性扫描能把输入电压波形如实地描绘出来，就像利用一条水平匀速运动的纸带来把作简谐运动的漏斗的沙子展开来得到简谐运动曲线一样. 如果横偏电压加非锯齿波电压，则称为非线性扫描，扫描出来的波形将不是原来的波形.

（2）只有输入电压与横偏扫描电压的周期严格形同，或者后者是前者的整数倍时，图形才会稳定（表示每次扫描起点相同，打出来的点在同一个位置重合）. 也就是说，构成稳定波形的条件是横偏扫描电压的周期 T_x 与输入纵偏电压的周期 T_y 之比为整数，即

$$\frac{T_x}{T_y}=n\quad(n=1,2,3,\cdots)$$

这时示波器上显示 n 个稳定波形，n 代表完整波形的数目. 然而，两个独立发生的电振荡频率在技术上难以调节成准确的整数倍，克服的办法通常是用 Y 轴输入信号频率去控制扫描发生器的频率，使扫描周期准确地等于输入信号周期或成整数倍. 电路的这个控制作用，称为“整步”或“同步”. 上述用 Y 轴输入信号频率控制扫描电压频率实现的同步称为“内同步”；用外加信号频率控制扫描发生器的频率而实现的同步则称为“外同步”. 同步功能的实现是由示波器上的“TRIGGERING”功能区来完成的.

（3）如果 Y 轴加正弦输入信号，横偏也加正弦扫描电压，则一般情况下光点的运动非常复杂，但只要两个交流电压的频率成整数比，光点便可描绘出李萨如图形，这是两个互相垂直的简谐振动合成的运动图形. 图 3.9.4 给出了不同频率比的李萨如图形.

李萨如图形既可以用来测量频率，还可以用来测量相位差，功率等. 本实验讨论用其测量频率的方法. 测量关系式为

$$\frac{f_y}{f_x}=\frac{n_x}{n_y}$$

式中，f_y，f_x 分别为 Y 方向和 X 方向上输入信号的频率，n_x 和 n_y 分别为李萨如图形假想外方框横方向和垂直方向上的切点数. 只要知道 Y 或 X 方向上的某个频率，利用李萨如图形和上述关系式就可得到另一个未知频率.

应该指出，若两个正弦电压信号是彼此独立的，则李萨如图形是调不到稳定不动的. 因此利用李萨如图形测频率的方法只适合频率较低，两频率相近的情况.

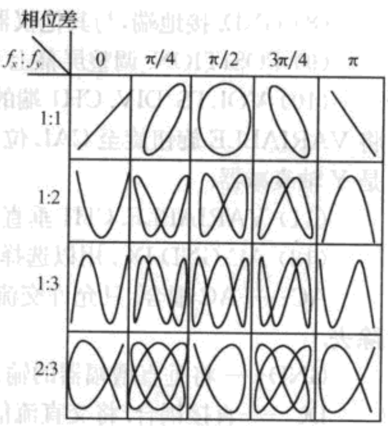


图 3.9.4

【仪器介绍】

本实验所用的 CS-4125 示波器面板图如图 3.9.5 所示.

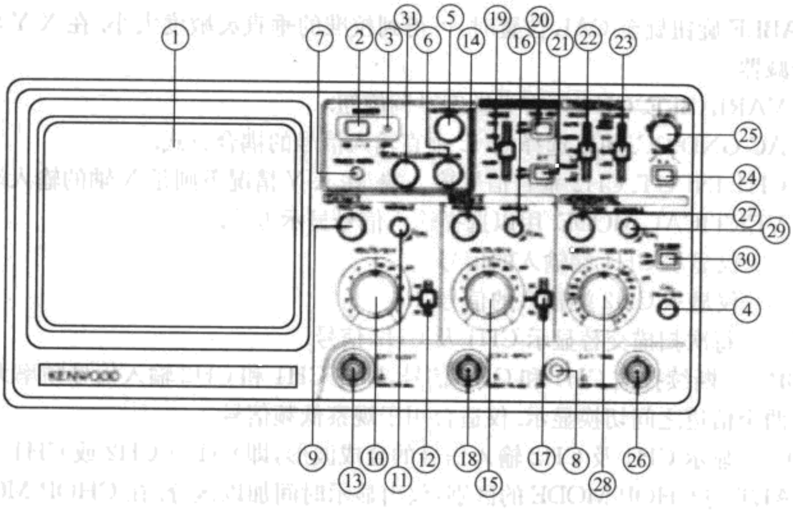


图 3.9.5

各部分(旋钮、按钮)的功能如下:

(1) CRT. 显示范围为垂直 8div(80mm)，水平 10div(100mm). 1div=1cm=1 大格.

(2) POWER ON/OFF. 示波器电源开关.

(3) 电源指示灯.

(4) CAL 端子. 标准方波输出端，正极性 $1V_{P-P}$，1000Hz，校准示波器用.

(5) INTENSITY. 调整显示亮线的亮度.

(6) FOCUS. 清晰度调节.

(7) TRACE ROTA. 调整水平亮线的倾角. 当水平亮线水平度受地磁作用影响时，可以调整此电位器使其水平.

(8) GND. 接地端，与其他仪器共同接地时使用.

(9) POSITION. 调整屏幕上 CH1 波形的垂直位置.

(10) VOLTS/DIV. CH1 端的垂直灵敏度调节旋钮. 此旋钮可在 1-2-5 级数间切换. 将 VARIABLE 旋钮旋至 CAL 位置时，可得到校准的垂直灵敏度大小. 在 X-Y 状态下则是 Y 轴衰减器.

(11) VARIABLE. CH1 垂直灵敏度微调旋钮.

(12) AC-GND-DC. 用以选择 CH1 垂直输入信号的耦合方式.

AC——AC 耦合. 只允许交流信号通过，若有直流成分或 $f<10\text{Hz}$ 的交流成分则被除去.

GND——将垂直增幅器的输入端接地，用以确认其接地电位.

DC——直接耦合. 将交直流信号同时加入到输入端.

(13) CH1 INPUT. CH1 垂直信号输入端. 在 X-Y 情况下则是 Y 轴的输入端.

(14) POSITION. 调整屏幕上 CH2 波形的垂直位置.

(15) VOLTS/DIV. CH2 端的垂直灵敏度调节旋钮. 此旋钮可在 1-2-5 级数间切换. 将 VARIABLE 旋钮旋至 CAL 位置时，可得到校准的垂直灵敏度大小. 在 X-Y 状态下则是 Y 轴衰减器.

(16) VARIABLE. CH2 垂直灵敏度微调旋钮.

(17) AC-GND-DC. 用以选择 CH2 垂直输入信号的耦合方式.

(18) CH1 INPUT. CH2 垂直信号输入端. 在 X-Y 情况下则是 X 轴的输入端.

(19) VERTICAL MODE. 用以选择输入信号显示方式.

CH1——仅显示 CH1 端输入的信号.

CH2——仅显示 CH2 端输入的信号.

ALT——每次扫描交替显示 CH1 及 CH2 信号.

CHOP——断续扫描 CH1 和 CH2 信号，即与 CH1 和 CH2 输入信号频率无关，而以 150kH 在两个信道之间切换显示. 仅适合用于观察低频信号.

ADD——显示 CH1 及 CH2 输入信号的合成波形，即 CH1+CH2 或 CH1−CH2.

注　ALT 与 CHOP MODE 的区别：仅由显示时间加以区分. 在 CHOP MODE 仅将两信道细分，然后在两信道间交替显示，并非完全扫描完一个信道再显示另一个信道，通常用于小于 1ms/div 的低速扫描即闪动率小的观测中. 而 ALT MODE 方式则在每次扫描完后交替切换显示，故各信道显示比较鲜明，通常用于高速扫描上.

(20) CH2 INV. CH2 输入信号极性反相按键.

(21) X-Y. CH2 水平垂直切换开关. 当按下此钮时，VERTICAL MODE 的设定不再有效，而将 CH1 变为 Y 轴，CH2 变为 X 轴.

(22) TRIGGERING MODE. 同步触发方式选择.

AUTO——由触发信号启动扫描，若无触发信号则显示 FREE RUN 亮线.

NORM——由触发信号启动扫描，但与 AUTO 不同的是，若无正确的触发信号则不会显示水平扫描亮线.

FIX——将同步电平 LEVEL 固定. 此时的同步与(25)LEVEL 无关，每次扫描固定

电平为 0 左右开始.

TV-FRAME——将电视复合信号中的垂直同步脉冲分离出来与触发电路结合使波形同步.

TV-LINE——将电视复合信号中的水平同步脉冲分离出来与触发电路结合使波形同步.

(23) SOURCE. 触发信号来源选择.

VERT MODE——触发信号来源由 VERTICAL MODE 加以选择,其方式如下表所示:

VERTICAL MODE	触发信号来源
CH1	CH1
CH2	CH2
ALT	由 CH1 和 CH2 交替作用
CHOP	CH1
ADD	CH1 和 CH2 合成信号

CH1——触发信号源为 CH1 端输入的信号.

CH2——触发信号源为 CH2 端输入的信号.

LINE——触发信号源为市电.

EXT——触发信号源为外部接入的信号(TRIGGER EXT. TRIG).

(24) SLOPE. 升降沿的选择. 用于选择触发扫描信号的升降沿. 当此按钮凸出时,采用触发信号的上升沿进行触发;当按下此钮时采用触发信号的下降沿进行触发.

(25) LEVEL. 触发电平调节旋钮. 用以选择从哪一点开始扫描.

(26) EXT. TRIG. 外部触发信号输入端.

(27) POSITION. 调整显示波形的水平位置.

(28) SWEEP TIME/DIV. 水平扫描灵敏度调节旋钮. 可在 $0.2\mu s \cdot div^{-1} \sim 0.5s \cdot div^{-1}$ 之间以 1-2-5 级数调整,共有 20 种变化.

(29) VARIABLE. 水平扫描灵敏度微调旋钮.

(30) ×10MAG. 水平波形扩大 10 倍按钮.

【实验内容】

(1) 利用示波器自身的标准方波对示波器进行校准. 用传输电缆的红色夹子夹住示波器上的"CAL"方波信号输出端,传输电缆的另一端接在 CH1 或 CH2. 然后通过示波器上的"VAR"旋钮来对示波器校准.

(2) 利用示波器的 CH1 或 CH2 来观察和测量信号. 首先选择信号发生器的输出信号波形,然后调节其输出频率和电压为某一个值,再将其接入示波器的 CH1 或 CH2 信道来进行测量验证.

(3) 观察李萨如图形并用其测量未知频率. 电子束在屏幕上同时做两个相互垂直的

简谐运动时，其合成轨迹随着它们的频率比值的不同，而得出一系列图形. 固定 X 方向为 $f=10\text{kHz}$，然后调节 Y 方向的频率，使得示波器上出现各种李萨如图形，从而代入公式计算出 Y 方向的频率.

(4) 利用"李萨如"图形来测量相位差（选做）.

【数据处理】

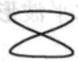
(1) 利用示波器自身的标准方波对示波器进行校准.

校准波形	电压/$V_{P\text{-}P}$	频率/Hz	VOTS/DIV	$DIV_{P\text{-}P}$	Time/DIV	DIV_T
方波 	1	1000				

(2) 利用示波器的 CH1 或 CH2 来观察和测量信号，并推导出上述三种波形系数（即 V_P 与 V_{RMS} 的大小关系）.

被测波形	信号源电压 /V_{RMS}	信号源频率 /Hz	VOTS/DIV	$DIV_{P\text{-}P}$	Time/DIV	DIV_T	测量电压大小	测量频率大小	波形系数 V_P/V_{RMS}
方波 	1	1000							
正弦波 	2	2000							
三角波 	2	5000							

(3) 观察李萨如图形并测量未知频率.

f_y/f_x	1∶1	2∶1	1∶2	3∶2
李萨如图形				
水平切点数 N_x	2	4	2	6
垂直切点数 N_y	2	2	4	4
已知 f_y(kHz)	10	10	10	10
计算 f_x(kHz)				
信号源读出 f_x'/Hz				
$E=\frac{\lvert f_x-f_x'\rvert}{f_x}$				

(4) 利用"李萨如"图形来测量相位差（自行设计数据表格）.

【预习思考】

(1) 开机后,应正确使用哪些旋钮,使屏幕上显示一个亮度适中、聚焦清晰、长度适中、位置适中的扫描线?在荧光屏上能观察到示波器产生的锯齿波吗?

(2) 在观察正弦信号时,波形向左运动,应增加扫描频率还是减少扫描频率?在观察李萨如图形时,为获得稳定的图形,能从图形变化的情况判断 Y 通道信号频率是偏大还是偏小吗?

(3) 欲把 75Hz 的正弦电压稳定地显示出五个周期长的波形图,试问:①X 轴应加什么波形电压,其频率为多少?②要使波形稳定且不发生畸变,选用何种扫描方式,调节哪些旋钮?③显示这样的 5 个较低频率的波形时,其波形显得比较闪烁(相比较高频率的信号如 750Hz),其原因是什么?

(4) 显示 75Hz 两个周期的正弦波形后,观察:①把 SLOPE 置于上升沿,调节 LEVEL,从 0 逐渐调至最大值,观察波形所受的影响;②把 SLOPE 置于下降沿,调节 LEVEL,观察波形图,分析其原因.

(5) 你所观测到的 5 个周期波形图,前后相邻的半波,其长度是否相等?设想把整个波形图的首尾衔接,能否构成 5 个完整的周期波形图?

【习题】

(1) 欲用示波器显示电压随时间变化的波形图时,被显示电压应由________两端钮输入示波器,通过 Y 通道加在示波管的两________偏转板间;________偏转板间应加________形电压;经________和________两步调节便可在屏上显示________波形图.

当用示波器显示李萨如图形时,应把两个________信号分别输入到示波器,并经各自通道到达________两偏转板间;在频率关系满足________条件时,便可在屏上显示________的李萨如图形.

(2) 假设示波器的信号 $Y=0.050\text{cm}\cdot\text{mV}^{-1}$,现欲显示一个峰值为 40mV 的余弦电压的波形,其波形的峰-峰值长度共是多少?如果被显示的电压的有效值为 30mV,其波形图的峰-峰值高度又是多少?

(3) 请推导出频率之比为 1∶1 的李萨如图形的轨迹方程(假定两信号之间的相位差为 0).

(4) 示波器的偏转灵敏度远比示波管的偏转灵敏度高,为什么?

实验 3.10 *RLC* 串联电路的稳态特性

在交流电或电子电路的研究中,常需要通过电阻、电感、电容元件不同组合的电路,用来改变输入正弦信号和输出正弦信号之间的相位差,或构成放大电路、振荡电路、选频电路、滤波电路等,因此,研究 *RLC* 电路及其过程,在物理学、工程技术上都有重要的意义.本实验着重研究 *RC*、*RL* 和 *RLC* 电路的稳态特性.

【实验目的】

(1) 观察、分析 RLC 串联电路中的相频和幅频特性，理解和具体应用此特性.

(2) 进一步学习用双踪示波器进行测量相位差.

【实验器材】

正弦信号发生器、毫伏表、双踪示波器、自感器、电容器、交流电阻箱.

【实验原理】

由于电容和电感在交流电路中的容抗和感抗与频率有关，所以，在交流电路中有电感和电容存在时，各元件上的电压和电路中的电流都会随频率的变化而发生变化，且回路中的总电流和总电压的相位差也和频率有关. 电流、电压的幅度与频率间的关系称为幅频特性；电流和电源电压间、各元件上的电压和电源电压间的相位差与电源的频率关系称为相频特性. 我们研究的是 RLC 串联电路的稳态特性. 所谓电路的稳态就是该电路在接通正弦交流电源一段时间(一般为电路的时间常数的 5～10 倍)以后，电路中的电流 i 和元件上电压(u_R、u_C、u_L)的波形已经发展到与电源电压波形相同且幅值稳定的状态.

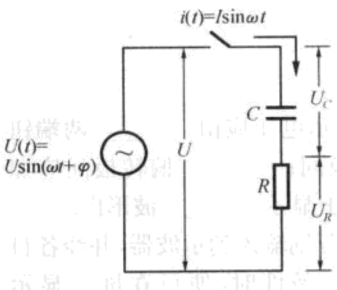


图 3.10.1

1. RC 串联电路的幅频特性和相频特性

我们知道，在图 3.10.1 的电路中，RC 总阻抗为

$$\tilde{Z} = R - \mathrm{j}\frac{1}{\omega C}$$

$\tilde{Z}$ 的模为

$$Z = |\tilde{Z}| = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

$\tilde{Z}$ 的辐角为

$$\varphi = \arctan\left(\frac{-\frac{1}{\omega C}}{R}\right) = -\arctan\frac{1}{\omega CR} \tag{3.10.1}$$

φ 为 U 和 I 之间的相位差，即 $\varphi = \varphi_U - \varphi_I$

根据交流欧姆定律，电阻两端的电压为

$$U_R = IR \tag{3.10.2}$$

电容两端的电压为

$$U_C = \frac{I}{\omega C} \tag{3.10.3}$$

总电压为

$$U = I\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} \tag{3.10.4}$$

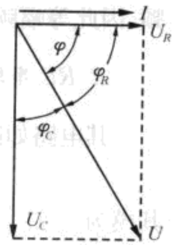


图 3.10.2

图 3.10.2 为上述电压、电流(有效值)的矢量图.

从(3.10.4)式中求出 I,然后分别代入(3.10.2)式、(3.10.3)式得

$$U_R=\frac{U}{\sqrt{1+\left(\frac{1}{\omega CR}\right)^2}} \tag{3.10.5}$$

$$U_C=\frac{U}{\sqrt{1+(\omega CR)^2}} \tag{3.10.6}$$

由上面有关公式得到下面几点结论:

(1) (3.10.5)式和(3.10.6)式表明如下幅频特性:

当 $\omega\to 0$ 时,$U_R\to 0$,$U_C\to U$;

当 ω 逐渐增大时,U_R 逐渐增大,U_C 逐渐减小;

当 $\omega\to\infty$时,$U_R\to U$,$U_C\to 0$.

幅频特性曲线如图 3.10.3 所示. 利用 U_R-ω 幅频曲线所表明的幅频特性可组成高通滤波器,而 U_C-ω 是低通滤波器的幅频特性.

(2) (3.10.1)式表明相频特性. 由图 3.10.2 和(3.10.1)式可知,输出电压 U_R 与输入电压 U 之间的相位差 $\varphi_R(=-\varphi)$与圆频率 ω 有关. 当 ω 很低时,$\varphi_R\to+\pi/2$;当 ω 很高时,$\varphi_R\to 0$,其关系曲线如图 3.10.4 所示. 由图 3.10.2 还可得出 $\varphi_C=-[(\pi/2)-|\varphi|]$. φ_C-ω 曲线也在图 3.10.4 中画出. 利用相频特性可组成相移电路.

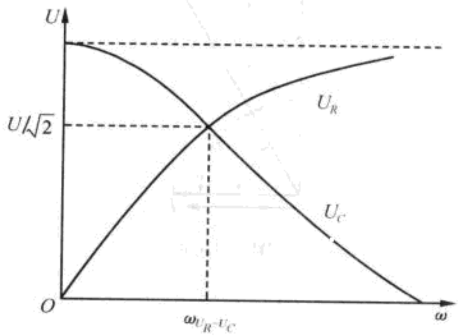


图 3.10.3

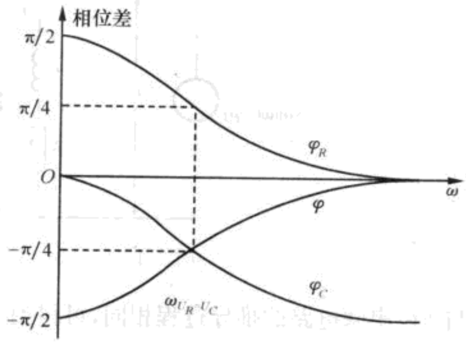


图 3.10.4

(3) 等幅频率(截止频率). 由(3.10.2)式和(3.10.3)式可知,当 $R=\dfrac{1}{\omega C}$时,$U_R=U_C$,我们把此时的频率记为 $f_{U_R=U_C}$,且

$$f_{U_R=U_C}=\frac{\omega_{U_R=U_C}}{2\pi}=\frac{1}{2\pi RC}$$

由(3.10.1)式、(3.10.5)式和(3.10.6)式可知,在此频率时可得

$$\varphi_R\to+\frac{\pi}{4},\quad \varphi_C\to-\frac{\pi}{4},\quad U_R=U_C=\frac{U}{\sqrt{2}}=0.707U$$

通常把 0.707U 作为能通过滤波器的电压的最低值,由此可知:高通滤波器的等幅频率是能通过的高频的下界频(图 3.10.3);低通滤波器的等幅频率是能通过的低频的上界

频，因此等幅频率又常称为截止频率.

2. *RL* 串联电路的幅频特性和相频特性

其电路如图 3.10.5 所示，*RL* 的总阻抗为

$$\tilde{Z} = R + \mathrm{j}\omega L$$

其模为

$$Z = |\tilde{Z}| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

其辐角为

$$\varphi = \arctan \frac{\omega L}{R} \tag{3.10.7}$$

对此电路有

$$U_R = IR \tag{3.10.8}$$

$$U_L = I\omega L \tag{3.10.9}$$

$$U = I\sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \tag{3.10.10}$$

图 3.10.6 为上述的电压、电流矢量图.

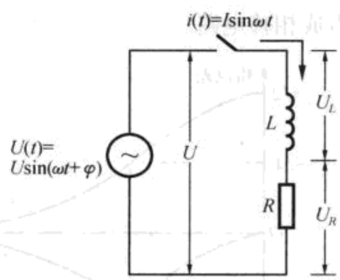


图 3.10.5

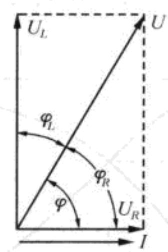


图 3.10.6

与 *RC* 串联电路的推导过程相同，可得到

$$U_R = \frac{U}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R}\right)^2}} \tag{3.10.11}$$

$$U_L = \frac{U}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{\omega L}\right)^2}} \tag{3.10.12}$$

由上面有关公式可得 *RL* 串联电路的特性.

1) 幅频特性

当 $\omega \to 0$ 时，$U_R \to U$，$U_L \to 0$；

当 ω 逐渐增大时，U_R 随着减小，U_L 逐渐增大；

当 $\omega \to \infty$ 时，$U_R \to 0$，$U_L \to U$.

其曲线如图 3.10.7 所示. 利用此幅频特性可组成滤波器.

2）相频特性

因为 $\varphi_R=-\varphi$, 故 φ_R-ω 相频特性曲线如图 3.10.8 所示. 可以看出，当 ω 从 0 逐渐增大并趋近于∞时，相应的 φ_R 从 0 逐渐减小并趋近于 $-\pi/2$. φ-ω 曲线也已在图 3.10.8 中画出.

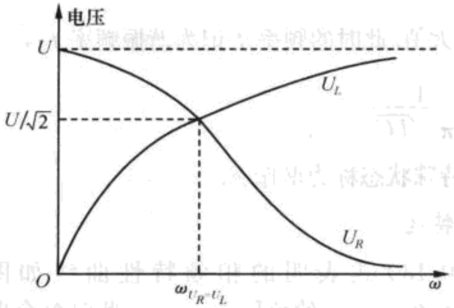


图 3.10.7

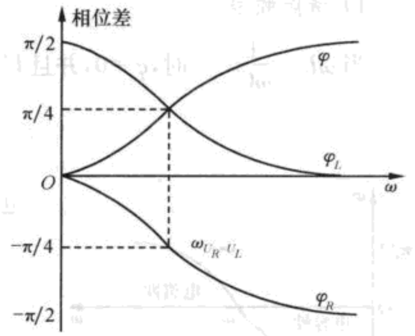


图 3.10.8

3）等幅频率（截止频率）

使 $U_R=U_L$ 的频率 $f_{U_R=U_L}$ 称为等幅频率，其值

$$f_{U_R=U_L}=\frac{\omega_{U_R=U_L}}{2\pi}=\frac{R}{2\pi\omega L}$$

在此频率下，有

$$\varphi_R\to-\frac{\pi}{4},\quad \varphi_L\to\frac{\pi}{4},\quad U_R=U_L=\frac{U}{\sqrt{2}}=0.707U$$

3. *RLC* 串联电路的相频特性

由于 *RLC* 串联电路的幅频特性在前面的实验（*RLC* 电路交流谐振）中已经学过，这里主要讨论其相频特性.

图 3.10.9 为电路图，总阻抗为

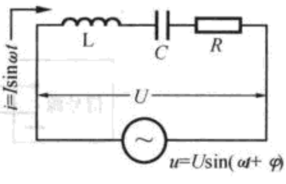


图 3.10.9

$$\tilde{Z}=R+\mathrm{j}\left(\omega L-\frac{1}{\omega C}\right)$$

其模为

$$Z=\sqrt{R^2+\left(\omega L-\frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

其辐角为

$$\varphi=\arctan\frac{\omega L-\frac{1}{\omega C}}{R}\tag{3.10.13}$$

R 上的电压为

$$U_R = IR = \frac{U}{Z}R = \frac{UR}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}\right)^2}} \quad (3.10.14)$$

由(3.10.13)式、(3.10.14)式可得出 RLC 串联电路的特性.

1) 谐振频率

当 $\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$ 时，$\varphi = 0$，并且 $U_R = U$ 为极大值.此时的频率 f 记为谐振频率 f_0，

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

电路的这一特殊状态称为谐振态.

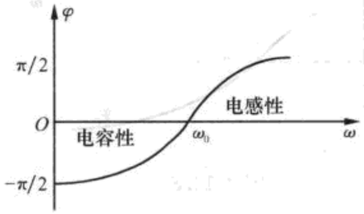


图 3.10.10

2) 相频特性

由(3.10.13)式表明的相频特性曲线如图 3.10.10 所示.在 $\omega < \omega_0$ 的范围内，$\varphi < 0$，此时整个电路呈电容性；在 $\omega > \omega_0$ 的范围内，$\varphi > 0$，此时整个电路呈电感性；在 $\omega = \omega_0$ 时，$\varphi = 0$，此时整个电路为纯电阻.

【实验内容】

1. 测量并作出 RC 串联电路的幅频、相频曲线

测量电路如图 3.10.11 所示，由 200Ω 的电阻和 0.07μF 的电容串联组成待测电路.接入该电路的信号源是 XD2 型晶体管信号发生器，它输出的正弦电压值和频率均可调节，并由仪器指示出来.真空管毫伏计(mV)和单刀双掷开关 K 相配合，分别测出 U_C、U_R. CS-4125 示波器有两种用途：①同时显示 U、U_R 两个电压的波形(此时图中带箭头的线与“CH2”相接)；②显示 U、U_R 的李萨如图形(此时图中带箭头的线与“X”相接).两种用途均可测 U 与 U_R 之间的相位差 φ.

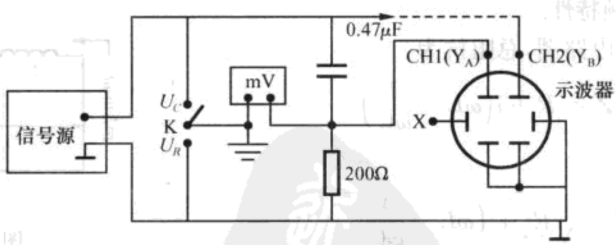


图 3.10.11

(1) 按照图 3.10.11 接好电路，并将仪器调至安全待测状态，然后接通各仪器的电源进行预热.

(2) 调节信号源使 $f = 500\text{Hz}$，$U = 3.0\text{V}_{\text{RMS}} = 8.5\text{V}_{\text{P-P}}$，并用毫伏表进行电压校准.

(3) 依次用电压表测出 R、C 上的电压 U_R、U_C，从示波器的李萨如图形上读出 x 轴与

图形相交的水平距离 $2x_0$ 和图形在 x 轴上的投影 $2X$.

(4) 仿照第(2)、(3)步,依次测出表 3.10.1 中其余 f 值条件下的 U_R、U_C 和 φ 值.

表 3.10.1 *RC* 幅频、相频曲线数据

$U=3.0V_{RMS}=8.5V_{P\text{-}P}$			$R=200\Omega$		$C=0.47\mu F$	
f/Hz	500	1200	1700	2000	3000	5000
U_R/V						
U_C/V						
$2x_0$/cm						
2X/cm						
φ/(°)						

2. 测量并做出 *RL* 串联电路的幅频、相频曲线

实验步骤与内容 1 相仿,将测得数据填入表 3.10.2 中

表 3.10.2 *RL* 幅频、相频曲线数据

$U=3.0V_{RMS}=8.5V_{P\text{-}P}$			$R=1000\Omega$		$L=0.1H$	
f/Hz	500	1200	1700	2000	3000	5000
U_R/V						
U_L/V						
$2x_0$/cm						
2X/cm						
φ/(°)						

3. 测量并做出 *RLC* 串联电路的相频曲线

测量电路与图 3.10.11 相仿,只是要将电压表去掉,然后将串联 LC 代替原来的 C 即可.

(1) 用李萨如图形找出谐振频率(必做).

(2) 测出 f=350Hz,600Hz,700Hz,780Hz,900Hz,1500Hz 条件下的 φ 值(选做).

【数据处理】

表 3.10.3 *RLC* 相频曲线数据

$U=3.0V_{RMS}=8.5V_{P\text{-}P}$			$R=1000\Omega$	$C=0.47\mu F$		$L=0.1H$
理论谐振频率 f_0=________				实验谐振频率 f_{0P}=________		
f/Hz	350	600	700	780	900	1500
$2x_0$/cm						
2X/cm						
φ/(°)						

【预习思考】

(1) 在只改变信号源的频率 f,而不改变输出电压的情况下,其 U 值是否改变?为什么?

(2) 在保持 $U=3.00\text{V}$ 的条件下,使 f 从 500Hz 增至 5000Hz,其中 U_R、U_C、$2x_0/2X$ 值相应如何变化?

【习题】

(1) 算出实验内容 RC 幅频相频中各 f 对应的 U_R、U_C(其中 $U=3.00\text{V}_{\text{RMS}}$),并在同一坐标纸上描出理论和实验的幅频曲线,并比较之.

(2) 算出所测各 f 对应的 φ 的理论值,分别描绘出理论和实验的相频曲线,并进行比较.

(3) 若取 $R=200\Omega$,$C=0.47\mu\text{F}$:①画出 RC 串联低通滤波器电路图(表明输入电压、输出电压);②求出此滤波器的截止频率 $f_{U_R=U_C}$ 值;③画出此 f 值时的 U、U_R、U_C 的矢量图;④求出此 f 值时的电压传输比(输出电压/输入电压)值;⑤写出此滤波器的通频范围.

(4) 在上题中,滤波器在上界频时输出电压的相位落后输入电压的相位多少弧度(即相移多少弧度)?在通频带范围内,频率由低至高变化时,相应的这种相移值的变化范围是怎样的?

【附录】 示波器测量相位差

示波器是测量相位差比较理想的仪器,用它测量相位差有两种方法.

1. 比较法(双踪示波法)

将 $u_R(t)$ 输入 CH1、$u(t)$ 输入 CH2,调节示波器有关旋钮,使 $u_R(t)$、$u(t)$ 出现如图 3.10.12 所示的数个周期波形图.

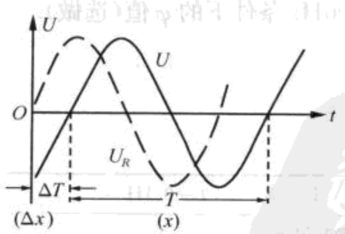


图 3.10.12

因为

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{\varphi}{\Delta T}$$

故

$$\varphi = \frac{\Delta T}{T} \cdot 2\pi$$

式中,T 和 ΔT 分别对应于荧光屏上横轴方向的长度 x、Δx(cm),故上式变为

$$\varphi = \frac{\Delta x}{x} \cdot 2\pi$$

由图读出 x、Δx,便可算出 φ.

当 $u_R(t)$、$u(t)$ 的波形如图 3.10.12 所示时,$u(t)$ 落后于 $u_R(t)$,此时算出的 φ 应取负

号;若 $u(t)$ 超前于 $u_R(t)$,则 φ 应取正号.

为了便于观测并使 φ 的测量误差较小,一般以调出1个或2个周期的波形图为宜.

2. 李萨如图法

将 $u_R(t)$ 信号作为垂直信号输入示波器的CH1、将 $u(t)$ 作为水平信号输入示波器的CH2,则在荧光屏上得到如图3.10.13中的某一种图形,这些是两个相互垂直的同频率的正弦振荡的合成图形,称为李萨如图形.下面推导用李萨如图形测量相位差 φ 的原理公式.我们知道,在两个互相垂直的方向上的振荡波形分别为

$$y = Y\sin\omega t \tag{3.10.15}$$

$$x = X\sin(\omega t + \varphi) \tag{3.10.16}$$

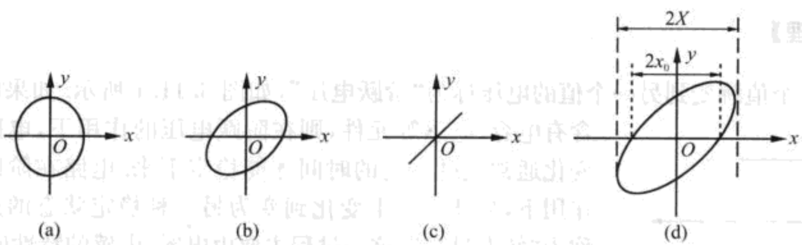


图 3.10.13

当 $y=0$ 时,由(3.10.15)式得 $\omega t=0$,此时(3.10.16)式变为

$$x = x_0 = X\sin\varphi$$

$$\sin\varphi = \frac{x_0}{X} = \frac{2x_0}{2X}$$

由此推导出用李萨如图形测量相位差 φ 的公式

$$\varphi = \arcsin\frac{2x_0}{2X} \tag{3.10.17}$$

例如,图3.10.13(a)中 $\varphi=\pm\frac{\pi}{2}$,图3.10.13(c)中 $\varphi=0$

注意:李萨如图形法只适合测10kHz以下的信号间的相位差,频率再高时,示波器的水平放大器的相移值与垂直放大器的相移值相差过大,会造成测量误差较大.

实验3.11 *RLC* 电路的暂态特性

在阶跃电压作用下,*RLC* 串联电路由一个平衡态跳变到另一个平衡态,这一转变过程称为暂态过程.在此期间电路中的电流及电容、电感上的电压呈现出规律性的变化,称为暂态特性.*RLC* 电路的暂态特性在实际工作中十分重要.例如,在脉冲电路中经常遇到元件的开关特性和电容充放电的问题;在电子技术中常利用暂态特性来改善波形.暂态过程研究牵涉到物理学的许多领域,在电子技术中的电路分析、信号系统中也得到广泛的应用.

【实验目的】

(1) 观测 RC、RL 及 RLC 电路的暂(瞬)态过程，加深对电容、电感特性的认识和对时间常数 RC、$\frac{L}{R}$、$\frac{2L}{R}$的理解.

(2) 分别观测 RLC 串联电路三种阻尼暂态过程，掌握其形成和转化条件.

(3) 学会用数字存储示波器观测暂态过程.

【实验器材】

低频信号发生器(用其中方波信号)、示波器、电感器、电容器及交流电阻箱.

【实验原理】

由一个值跳变到另一个值的电压称为"阶跃电压"，如图 3.11.1 所示. 如果电路中包含有电容、电感等元件，则在阶跃电压的作用下，电路状态的变化通常经过一定的时间才能稳定下来. 电路在阶跃电压的作用下，从开始发生变化到变为另一种稳定状态的过渡过程称为"暂态过程". 这一过程主要由电容、电感的特性所决定.

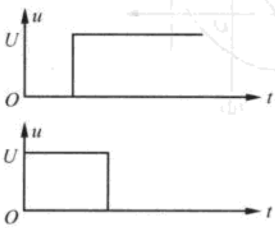


图 3.11.1

1. *RC* 串联电路的暂态过程

RC 电路暂态过程可以分为充电过程和放电过程，首先研究充电过程.

图 3.11.2 为研究 RC 暂态过程的电路. 当开关 K 接到"1"点时，电源 U 通过电阻 R 对 C 充电，此充电过程满足如下方程

$$R\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}+\frac{q}{C}=U \tag{3.11.1}$$

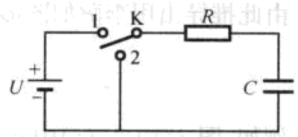


图 3.11.2

式中，q 为电容 C 上的电荷，$\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}$为电路中的电流. 考虑初始条件 $t=0, q_0=0$，便得到

$$q=CU(1-\mathrm{e}^{-t/RC}) \tag{3.11.2}$$

因而有

$$u_C=\frac{q}{C}=U(1-\mathrm{e}^{-t/RC}) \tag{3.11.3}$$

$$i=\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}=\frac{U}{R}\mathrm{e}^{-t/RC} \tag{3.11.4}$$

$$u_R=Ri=U\mathrm{e}^{-t/RC} \tag{3.11.5}$$

以上四式都是指数形式，我们只需观测电容电压 u_C 随时间的变化规律，就可以了解其余三个量随时间的变化规律. 其中 $RC=\tau$ 称为电路的时间常数. 充电和放电的快慢由 RC 决定. 由(3.11.3)式可得，当 $t=\tau$ 时，$u_C=0.632U$.

图 3.11.3 为 $u_C(t)$ 的变化曲线. 可以看出，τ 越大，充电过程越慢. 其原因是不难理解的.

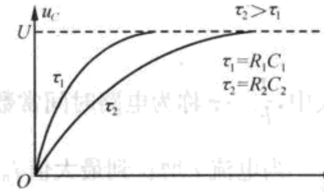


图 3.11.3

当 u_C 增大到 E 时，电路即达到了稳定状态，此后若将图 3.11.2 中的开关 K 由"1"点迅速转接到"2"点，则电容 C 将通过 R 放电，此放电过程的微分方程为

$$R\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}+\frac{q}{C}=0 \tag{3.11.6}$$

考虑初始条件 $t=0$ 时，$q_0=CU$，于是得到

$$q=CU\mathrm{e}^{-t/RC} \tag{3.11.7}$$

因而有

$$u_C=\frac{q}{C}=U\mathrm{e}^{-t/RC} \tag{3.11.8}$$

$$i=\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}=-\frac{U}{R}\mathrm{e}^{-t/RC} \tag{3.11.9}$$

$$u_R=Ri=-U\mathrm{e}^{-t/RC} \tag{3.11.10}$$

式中，i 与 u_R 两等式右边的负号表示放电电流方向与充电电流方向相反. 由公式可知放电过程也是按指数形式变化的，当 $t=\tau$ 时，$u_C=0.368U$. u_C 随 t 的变化关系如图 3.11.4 所示.

2. *RL* 电路的暂态过程

RL 电路的暂态过程分为电流增长和衰减两个过程. 图 3.11.5 就是实现这两个过程的电路图.

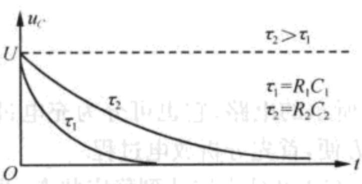


图 3.11.4

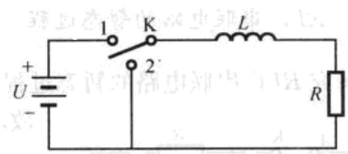


图 3.11.5

当开关 K 接到"1"时，为电流增长过程. 设 t 时刻的电流为 i，电感 L 上的感应电动势为 $\varepsilon=-L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$，则有电路方程

$$L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}+Ri=U \tag{3.11.11}$$

由于 L 的影响，电流不能突变. 因此在初始条件为 $t=0$ 时，$i=0$，方程的解为

$$i=\frac{U}{R}\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{R}{L}t}\right) \tag{3.11.12}$$

因而有

$$u_R=Ri=U\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{R}{L}t}\right) \tag{3.11.13}$$

$$u_L = L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = U\mathrm{e}^{-\frac{R}{L}t} \tag{3.11.14}$$

式中，$\frac{L}{R}=\tau$ 称为电路时间常数.

当电流 i 增长到最大值 $i_m=\frac{U}{R}$ 时，电路进入稳定状态. 此时若将开关 K 由"1"迅速接到"2"，则为电流衰减过程，其电路方程为

$$L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + Ri = 0 \tag{3.11.15}$$

考虑初始条件 $t=0$ 时，$i=\frac{U}{R}$，得到它的解为

$$i = \frac{U}{R}\mathrm{e}^{-\frac{R}{L}t} \tag{3.11.16}$$

因而有

$$u_R = Ri = U\mathrm{e}^{-\frac{R}{L}t} \tag{3.11.17}$$

$$u_L = L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = -U\mathrm{e}^{-\frac{R}{L}t} \tag{3.11.18}$$

(3.11.18)式右边的负号表示电流衰减时 L 上的自感电动势与电流的方向相反，其时间常数仍为 $\frac{L}{R}=\tau$.

若将 RL 电路与 RC 电路的解作比较，可以看出，两者的电流、电压都同样按指数规律变化.

观察 RL 电路中 R 两端的电压 u_R 的变化，就像观测 RC 电路的 u_C 变化一样，此时 u_R 反映了 L 所储存的能量状态.

3. *RLC* 串联电路的暂态过程

研究 RLC 串联电路的暂态过程可用图 3.11.6 所示的电路，它也可分为充电过程和放电过程. 为讨论方便，首先分析放电过程.

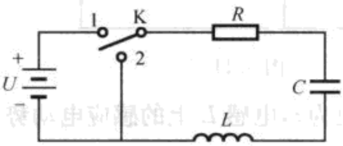


图 3.11.6

设开关 K 已接在 1 并使电路达到稳定状态，此时电容的电压 $u_C=U$. 现将开关 K 迅速由"1"转到"2"，电容 C 将通过 L 和 R 放电，其方程为

$$L\frac{\mathrm{d}^2q}{\mathrm{d}t^2} + R\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} + \frac{q}{C} = 0 \tag{3.11.19}$$

式中，$L\frac{\mathrm{d}^2q}{\mathrm{d}t^2}=\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$ 为电流随时间的变化率，它的初始条件为 $t_1=0, q_0=CU, i_0=\left.\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}\right|_{i=0}=0$，此方程的求解可分以下三种情况讨论：

(1) 当 $R^2<\frac{4L}{C}$ 时，方程(3.11.19)的解为

$$q(t) = CU\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}\cos(\omega t + \varphi) \tag{3.11.20}$$

其图形如图 3.11.7 中的曲线 *I*.图中振幅衰减的时间常数$\frac{2L}{R}=\tau$,振荡的圆频率为

$$\omega=\frac{1}{\sqrt{LC}}\sqrt{1-\frac{R^2C}{4L}} \qquad (3.11.21)$$

此解表明,电路中电容器放电所余的瞬间电量 q 以欠阻尼振荡暂态过程趋于稳态($q=0$).

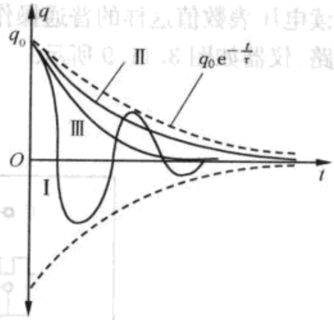


图 3.11.7

(2) 当 $R^2>\frac{4L}{C}$时,此方程的解为

$$q(t)=CUe^{-\frac{t}{\tau}}ch(\omega t+\varphi) \qquad (3.11.22)$$

式中

$$\tau=\frac{2L}{R}$$

$$\omega=\frac{1}{\sqrt{LC}}\sqrt{\frac{R^2C}{4L}-1} \qquad (3.11.23)$$

由于双曲余弦函数与余弦函数具有完全不同的性质,因而尽管(3.11.22)式与(3.11.20)式在形式上相同,但(3.11.22)式中的 τ 和 ω 不能再理解为"时间常数"和"圆频率".(3.11.22)式的图形如图 3.11.7 中的曲线Ⅱ所示,为过阻尼暂态过程.

(3) 当 $R^2=\frac{4L}{C}$时,方程的解为

$$q(t)=CUe^{-\frac{t}{\tau}}\left(1+\frac{t}{\tau}\right) \qquad (3.11.24)$$

其曲线如图 3.11.7 中的Ⅲ所示.它是欠阻尼和过阻尼间的临界阻尼的暂态过程.此时的电阻值 $R=2\sqrt{L/C}=R_{CP}$ 称为临界电阻.

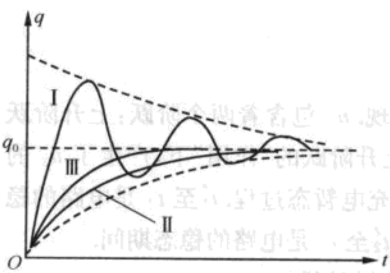


图 3.11.8

RLC 串联电路的充电暂态过程可由图 3.11.8 中开关 K 从"2"转接到"1"来实现,充电暂态过程的方程为

$$L\frac{d^2q}{dt^2}+R\frac{dq}{dt}+\frac{q}{C}=E \qquad (3.11.25)$$

和放电过程相比,其解仅差一个常数,相应的三种充电暂态过程曲线如图 3.11.8 所示.

由上述讨论可知,*RLC* 电路在充、放电过程中究竟以哪一种暂态过程趋于稳定态,完全由此电路具体的 R 和 $2\sqrt{L/C}$之值决定.

实验时,观测 u_C,用以代替 q.

4. 观测暂态过程的方法(以 *RC* 电路为例)

本实验所研究的电路,其参数的暂态过程非常短暂,用手动扳开关 K、记停表时间和

读电压表数值这样的普通操作方法是无法观测的，因此这里采用的是“电子电路”法，其电路、仪器如图 3.11.9 所示.

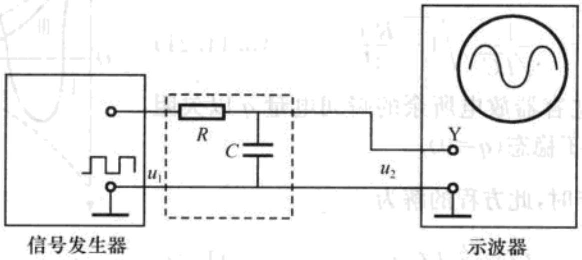


图 3.11.9

图中，R 和 C 串联构成待测电路. 方波发生器输出方波信号电压 u_1，相当于图 3.11.2 中的 U 和周期性的转换开关 K；$u_2(u_C)$ 的暂态过程波形由示波器显示出来.

图 3.11.10 是 u_1、u_2 的波形图.

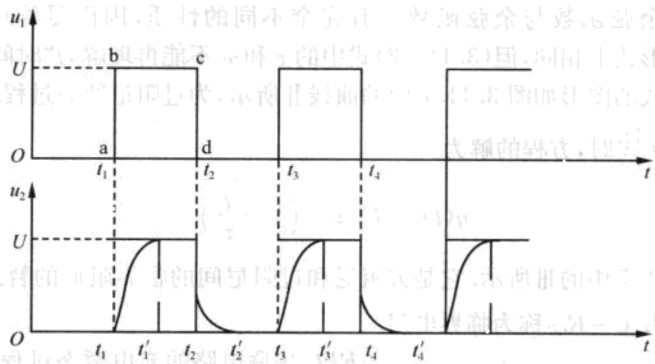


图 3.11.10

现以 u_1 的第一个方波(abcd)为例来说明过程的实现. u_1 包含着两个阶跃：上升阶跃 ab，它对应的时刻为 t_1，t_2 为下降阶跃时刻(cd). 在 u_1 上升阶跃的“作用”下，产生了 u_2 的上升暂态过程，此过程经历了 t_1 至 t_1'时间，这是电路的充电暂态过程. t_1'至 t_2 是电路的稳态期间. 同样分析可得，t_2 至 t_2'是电路的放电暂态过程，t_2'至 t_3 是电路的稳态期间.

示波器不但能显示 u_1、u_2 波形，而且能测出有关的时间间隔.

【实验内容】

1. 观察 RC 电路的 u_C 和 τ

(1) 如图 3.11.6 所示，连接电路，并把仪器调整到安全待测状态，此状态包括：

① 信号源的“输出调节”旋钮旋至输出电压最小处.

② 示波器的“辉度”旋钮旋至最暗位置.

③ $R=6000\Omega, C=0.015\mu F$.
然后接通电源，方波 $f=500Hz$，幅度 $U=3V$.

(2) 用示波器观察 u_1、u_2 的波形图(显示的方波个数以少为好). 将 u_1 接在 CH1 上，u_2 接在 CH2 上.

(3) 改变 R、C，观察波形变化规律.

(4) 取合适的 R、C 值，用最小二乘法测出 τ 值. 要求把 R、C 值及其 τ 的理论值、实际值均按测量精度列于自行设计的记录表格中.

2. 观察 RL 电路的 u_R 并测 τ

L 是一个值约为 0.1H 的自绕自感器，R 应在 $(6\sim9)\times10^2\Omega$ 内取值.

3. 观测 RLC 串联电路的三种阻尼暂态过程

自己确定实验电路.

(1) 连接好电路，并把仪器置于安全待测态. 其中，R 在 $2.0\times10^2\sim1.02\times10^4\Omega$ 范围内取值，$C=0.015\mu F$，$L=0.1H$. 然后接通电源.

(2) 粗略观察 R 在 $2.0\times10^2\sim1.02\times10^4\Omega$ 内变化时，其 u_C 的暂态过程随之变化的情况. 然后调节出临界阻尼暂态过程，按判断临界阻尼过程的精度，记下临界电阻值 R_{CP}，并与理论值 R_{Ct} 相比较.

(3) 测出 $R=200\Omega$，$C=0.015\mu F$，$L=0.1H$ 的欠阻尼振荡的周期 T_P，并与其理论值 T_t 相比较.

测量振荡周期 T_P，由示波器观察在方波的半个周期 $T/2$ 内衰减振荡的次数 N，则振荡周期 $T_P=\dfrac{T}{2N}$.

(4) 测出欠阻尼振荡的 τ_P，并与理论值 τ_t 相比较.
在估算 T_t 和 τ_t 时，RLC 的总电阻

$$R_S=R+r_i+r_C+r_L$$

式中，$r_i=1.4\times10^2\Omega$ 为电源内阻，r_L 在 L 上已标出，r_C 可忽略. 要求把以上观测的条件和结果科学地归纳，列成表格，并记录下来.

(5) 分别粗略观察 R、C 值的变化对欠阻尼振荡 u_C 波形的影响，并解释之.

(6) 用周期性矩形脉冲观察 RC 微分、积分电路，并记录其波形(可利用存储示波器的存储功能将其拷贝到磁盘中打印出来).

【预习思考】

(1) 在 RC 电路中，当 τ 比方波的半个周期大得很多或小得很多时候(相差几十倍以上)各有什么现象？

(2) 在 RLC 的实验电路中，在仅把 R 由 200Ω 逐步加至 $1.02\times10^4\Omega$ 的过程中，u_C 暂态过程按顺序如何变换？相应的波形是怎样的？

(3) u_C 的临界阻尼暂态过程的波形，与欠阻尼、过阻尼有何差异？我们采用什么方

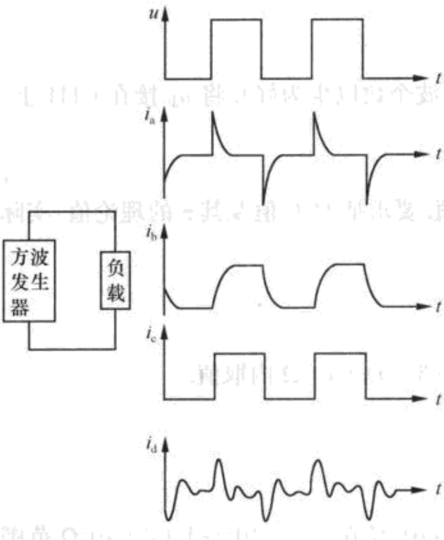


图 3.11.11

法可使 u_C 逼近临界阻尼暂态过程?

(4) 分别改变 R、C 值,则对 RLC 电路的欠阻尼振荡的 ω 和 τ 各产生什么影响?

【习题】

(1) 在一个直流电源供电,只有 R、L、C 三元件任意组合的电路中,如果电流的暂态出现低频振荡,则电路中必然存在着________(元件),该________与________共同产生________振荡,该振荡持续时间较长,其________的值一定很小.

(2) 在图 3.11.11 所示的方波电路中,若负载电路先后为四种情况,其对应的波形为 i_a、i_b、i_c、i_d,试分析这四种负载各对应是 R、L、C 中的哪一个或者哪两个、三个串联?

【附录】 数字存储示波器介绍

数字存储示波器是用 A/D 变换器把模拟信号转换成数字信号,然后存在半导体存储器 RAM 中,需要时将 RAM 中的存储内容调出,通过相应的 D/A 变换器,再恢复成模拟量显示在示波管屏幕上. 在这种示波器中信号处理功能和信号显示功能是分开的. 它的性能完全取决于进行信号处理的 A/D、D/A 变换器和半导体存储器的性能.

在数字存储示波器中,把输入的被测模拟信号先送至 A/D 变换器进行取样、量化和编码,成为数字“1”、“0”码,存储到 RAM 中,这个过程称为存储器的“写过程”,然后再将这些码从 RAM 中依次取出,顺序排列,经 D/A 转换使其包络重现输入模拟信号,这就是“读过程”. 在数字存储示波器中,采用实时取样方式,既可观测单次信号,也可以观察到重复信号;采用顺序取样或随机取样方式的只能观测到重复信号. 图 3.11.12 为存储示波器基本方框图.

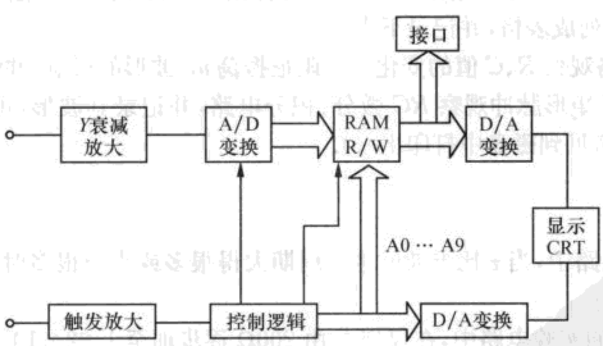


图 3.11.12　示存储示波器基本方框图

下面就本实验所用到的存储数字示波器 AGILENT 54621A 的前面板图 3.11.13 和屏幕图 3.11.14 作简要的说明.

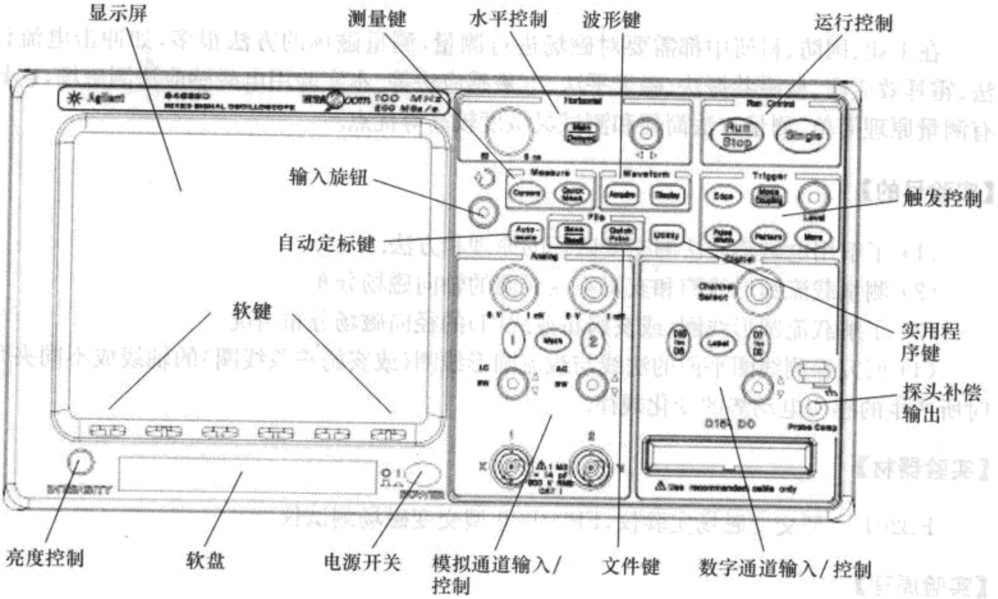


图 3.11.13 存储示波器前面板图

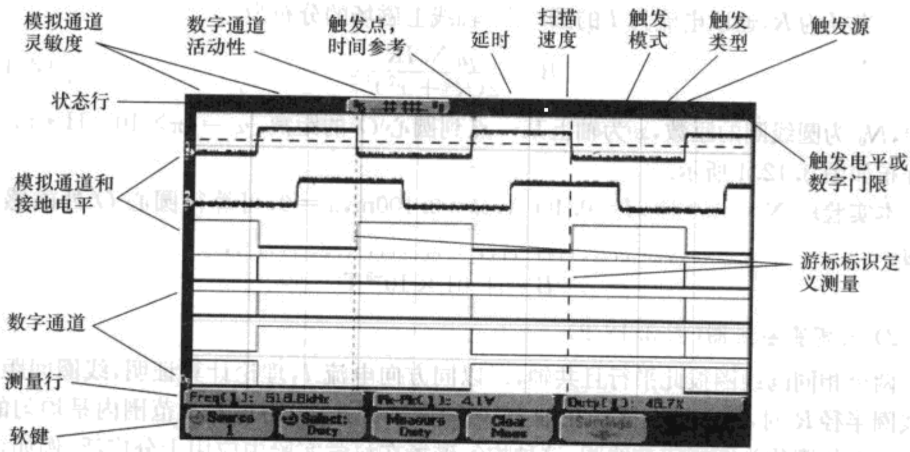


图 3.11.14 存储示波器屏幕说明

其他更详细的信息及使用说明请参阅 AGILENT 公司网站或到武汉大学物理实验中心网站 http://wlsyzx.whu.edu.cn/下载.

实验 3.12　用电磁感应法测交变磁场

在工业、国防、科研中都需要对磁场进行测量，测量磁场的方法很多，如冲击电流计法、霍耳效应法、核磁共振法、磁天平法、电磁感应法等.本实验用电磁感应法测磁场，它具有测量原理简单、测量方法简便和测试灵敏度较高等优点.

【实验目的】

(1) 了解用电磁感应法测交变磁场的原理和方法.

(2) 测量载流圆形线圈和亥姆霍兹线圈的轴向磁场分布.

(3) 了解载流圆形线圈(或亥姆霍兹线圈)的径向磁场分布情况.

(4) 研究探测线圈平面的法线与载流圆形线圈(或亥姆霍兹线圈)的轴线成不同夹角时所产生的感应电动势的变化规律.

【实验器材】

FB201-Ⅰ型交变磁场实验仪，FB201-Ⅱ型交变磁场测试仪

【实验原理】

1. 载流圆线圈与亥姆霍兹线圈的磁场

1) 载流圆线圈磁场

一半径为 R，通以电流为 I 的圆线圈，轴线上磁场的分布为

$$B=\frac{\mu_0 N_0 I R^2}{2(R^2+x^2)^{3/2}} \tag{3.12.1}$$

式中，N_0 为圆线圈的匝数，x 为轴上某一点到圆心 O' 的距离. $\mu_0=4\pi\times10^{-7}\,\mathrm{H\cdot m^{-1}}$，它的分布如图 3.12.1 所示.

本实验取 $N_0=400$ 匝，$I=0.400\mathrm{A}$，$R=0.100\mathrm{m}$，$x=0$，可算得圆心 O' 处磁感应强度为

$$B=1.01\times10^{-3}\,\mathrm{T}$$

2) 亥姆霍兹线圈(图 3.12.2)

两个相同圆线圈彼此平行且共轴，通以同方向电流 I，理论计算证明，线圈间距 a 等于线圈半径 R 时，两线圈合磁场在轴上(两线圈圆心连线)附近较大范围内是均匀的，这样的一对线圈称为亥姆霍兹线圈.这种均匀磁场在科学实验中应用十分广泛.例如，显像管中的行、场偏转线圈就是经过适当变形的亥姆霍兹线圈.

2. 用电磁感应法测磁场的原理

设均匀交变磁场为(由通交变电流的线圈产生)

$$B=B_{\mathrm{m}}\sin\omega t$$

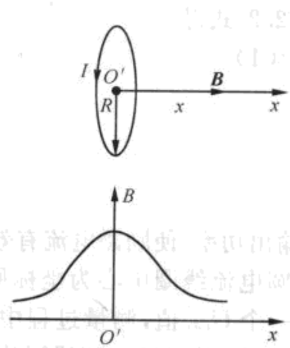


图 3.12.1　载流圆线圈磁场分

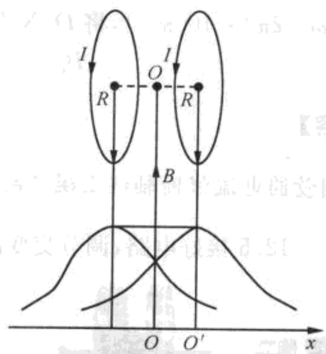


图 3.12.2　亥姆霍兹线圈的磁场

磁场中一探测线圈的磁通量为

$$\Phi = NSB_m\cos\theta\sin\omega t$$

式中，N 为探测线圈的匝数，S 为该线圈的截面积，θ 为 $\boldsymbol{B}$ 与线圈法线夹角，如图 3.12.3 所示. 线圈产生的感应电动势为

$$\varepsilon = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -NS\omega B_m\cos\theta\cos\omega t = -\varepsilon_m\cos\omega t$$

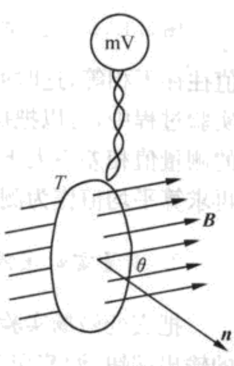


图 3.12.3　探测线圈在磁场中

式中，$\varepsilon_m = NS\omega B_m\cos\theta$ 是线圈法线和磁场成 θ 角时，感应电动势的幅值. 当 $\theta=0°$，$\varepsilon_{max} = NS\omega B_m$，这时的感应电动势的幅值最大. 如果用数字式毫伏表测量此时线圈的电动势，则毫伏表的示值(有效值)U_{max}应为$\frac{\varepsilon_{max}}{\sqrt{2}}$，则

$$B_{max} = \frac{\varepsilon_{max}}{NS\omega} = \frac{\sqrt{2}U_{max}}{NS\omega} \tag{3.12.2}$$

由此式可算出 B_m 来.

3. **探测线圈的设计**

实验中由于磁场的不均匀性，探测线圈不可能做得很小，否则将会影响测量灵敏度. 一般设计的线圈长度 L 和外径 D 应满足 $L=\frac{2}{3}D$ 的关系，线圈的内径 d 与外径 D 之比 $d\leqslant\frac{D}{3}$.（本实验室选取 $D=0.012\text{m}$，$N=800$ 匝的线圈）（图 3.12.4）. 探测线圈在磁场中的等效面积，经理论计算，可用

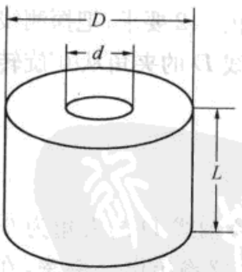


图 3.12.4　探测线圈外

$$S = \frac{13}{108}\pi D^2 \tag{3.12.3}$$

表示. 这样的线圈测得的平均磁感强度可以近似看成是线圈中心点的磁感应强度.

本实验励磁电流由专用的交变磁场测试仪提供，该仪器输出的交变电流的频率 f 可以从 20～200Hz 连续调节，如选择 $f=$

50Hz，则 $\omega=2\pi f=100\pi s^{-1}$，将 D、N 及 ω 值代入(3.12.2)式得

$$B_m = 0.103U_{max} \times 10^{-3}(T) \qquad (3.12.4)$$

【实验内容】

1. *测量圆电流线圈轴线上磁场的分布*

按图 3.12.5 接好电路，调节交变磁场实验仪的输出功率，使励磁电流有效值为 $I=0.400A$，以圆电流线圈中心为坐标原点，每隔 10.0mm 测一个 U_{max} 值，测量过程中注意保持励磁电流值不变，并保证探测线圈法线方向与圆电流线圈轴线 D 的夹角为 0°(从理论上可知，如果转动探测线圈，当 $\theta=0°$ 和 $\theta=180°$ 时应该得到两个相同的 U_{max} 值，但实际测量时，这两个值往往不相等，这时就应该分别测出这两个值，然后取其平均值作为对应点的磁场强度).

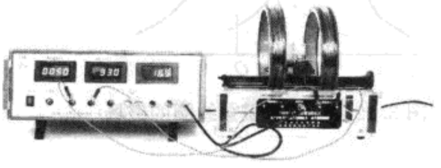


图 3.12.5　交变磁场测定装置图

实验过程中，可以把探测线圈从 $\theta=0°$ 转到 180°，测量一组数据对比一下，如果正、反方向的测量值相差不大于 2%，则只做一个方向的数据即可，否则，应分别按正、反方向测量，再求算平均值作为测量结果.

2. *测量亥姆霍兹线圈轴线磁场的分布*

把交变磁场实验仪的两组线圈串联起来(注意极性不要接反)，接到交变磁场测试仪的输出端钮. 调节交变磁场测试仪的输出功率，使励磁电流有效值仍为 $I=0.400A$. 以两个圆线圈轴线上的中心点为坐标原点，每隔 10.0mm 测一个 U_{max} 值.

3. *测量亥姆霍兹线圈沿径向的磁场分布*

按实验内容 2 固定探测线圈法线方向与圆电流轴线 D 的夹角为 0°，转动探测线圈径向移动手轮，每移动 10.0mm 测量一个数据，按正、负方测到边缘为止，记录数据并作出磁场分布曲线图.

4. *验证公式*

$\varepsilon_m=NS\omega B_m\cos\theta$，当 $NS\omega B_m$ 不变时，ε_m 与 $\cos\theta$ 成正比. 按实验内容 2 要求，把探测线圈沿轴线固定在某一位置，并使探测线圈法线方向与圆电流线圈轴线 D 的夹角从 0°旋转到 90°，每改变 10°测一组数据.

5. *研究励磁电流频率改变对磁场强度的影响*

把探测线圈固定在亥姆霍兹线圈中心点，其法线方向与圆电流轴线 D 的夹角为 0°(注：亦可选取其他位置或其他方向)，并保持不变. 调节磁场测试仪输出电流频率，在 20～150Hz 范围内，每次频率递增 10Hz，逐次测量感应电动势的数值并记录.

【数据处理】

(1) 记录圆电流线圈轴线上磁场分布的测量数据(表 3.12.1)(注意坐标原点设在圆心处.要求列表记录,表格中包括测点位置,数字式毫伏表读数以 U_{max} 换算得到的 B_m 值,并在表格中表示出各测点对应的理论值),在同一坐标纸上画出实验曲线与理论曲线.

表 3.12.1 圆电流线圈轴线上磁场分布的测量数据表

轴向距离 $x/10^{-2}$m	0.0	1.0	2.0	3.0	…	10.0
U_m/mV						
$B_m=0.103U_{max}\times10^{-3}$/T						
$B=\frac{\mu_0 N_0 IR^2}{2(R^2+x^2)^{3/2}}$/T						

(2) 记录亥姆霍兹线圈轴线磁场分布的测量数据(表 3.12.2)(注意坐标原点设在两个线圈圆心连线的中点 O 处),在方格坐标纸上画出实验曲线.

表 3.12.2 亥姆霍兹线圈轴线上的磁场分布的测量数据表

轴向距离 $x/10^{-2}$m	0.0	1.0	2.0	3.0	…	12.0
U_m/mV						
$B_m=0.103U_{max}\times10^{-3}$/T						

(3) 测量亥姆霍兹线圈径向磁场分布(表 3.12.3).

表 3.12.3 测量亥姆霍兹线圈径向上磁场分布数据表

径向距离 $x/10^{-2}$m	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
U_m/mV						
$B_m=0.103U_{max}\times10^{-3}$/T						

(4) 验证公式 $\varepsilon_m=NS\omega B_m\cos\theta$,以角度为横坐标,以磁场强度 B_m 为纵坐标作图(表 3.12.4).

表 3.12.4 探测线圈法线与磁场方向不同夹角数据表

探测线圈转角 θ	0.0°	10.0°	20.0°	30.0°	…	90.0°
U_m/mV						
$B_m=0.103U_{max}\times10^{-3}$/T						

(5) 记录励磁电流频率变化对磁场影响的实验数据(表 3.12.5).以频率为横坐标,磁场强度 B_m 为纵坐标作图,并对实验结果进行讨论.

表 3.12.5 励磁电流频率变化对磁场的影响数据表

励磁电流频率 f/Hz	20	30	40	50	…	150
U_m/mV						
$B_m\times10^{-3}$/T						

【预习思考】

(1) 圆电流线圈轴线上磁场的分布规律如何?亥姆霍兹线圈是怎样组成的?其基本条件有哪些?它的磁场分布特点又怎样?

(2) 探测线圈的设计要解决哪些关键问题?

(3) 测量感应电动势的毫伏表应具备什么特点? 感应法测磁场为何不用普通电压表?

【习题】

(1) 探测线圈放入磁场后,不同方向上毫伏表的指示值不同,哪个方向最大? 如何准确测量 U_{max} 的值? 毫伏表指示值最小表示什么?

(2) 试分析圆电流线圈磁场分布的实验结果与理论值之间的误差产生的原因?

实验 3.13 铁磁物质磁化特性曲线的测定

铁磁物质的磁化曲线,是指给予它的不同的磁化场 H 与随磁化场而改变的磁感应强度 B 之间的关系曲线,即 B-H 曲线.

影响铁磁物质磁化曲线的因素很多.材料的杂质含量、晶体结构、加工方式、外界温度、内部的应力以及磁化历史等都会对磁化特性产生影响.由于影响磁化特性的因素很多,因此 B-H 的关系就特别复杂.直至今天,人们还未从理论上定量描述磁化曲线、确定它的分析表达式.于是人们就用实验的方法来测定磁化曲线.

【实验目的】

(1) 了解铁磁物质的基本磁化特性.

(2) 掌握铁磁物质磁化特性曲线的测量方法.

【仪器用具】

(1) 冲击电流计.

(2) 标准互感器:0.05H,额定电流 0.15A.

(3) 螺绕环.

(4) 多量程的直流安培计:0.1/0.3…15/30A.

(5) 滑线电阻器.

(6) 转盘电阻箱:0.1~9999.9Ω.

(7) 晶体管稳压电源:0~30V,0~5A.

(8) 单相调压变压器.

(9) 交流安培计.

【实验原理】

1. 冲击电流计测量电量的原理

冲击法测量电量的主要仪器是冲击电流计.冲击电流计的构造和磁电式灵敏电流计的构造一样,是由一个固定的永久磁铁和一个可以转动的线圈所构成.它们唯一的差别是冲击电流计的线圈扁而宽或带一圆盘形重物,如图 3.13.1 所示,从而使线圈的转动惯量 I 较大,自由振荡周期 T_0 较长($T_0=2\pi\sqrt{I/D}$,式中 D 为线圈悬丝的扭转系数),普通磁

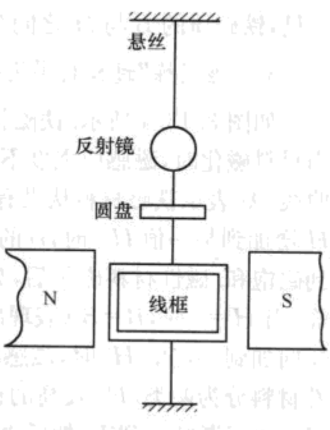


图 3.13.1

电式检流计的 T_0 为 3～5s，而冲击电流计的 T_0 约为 20s. 正因为冲击电流计具有 T_0 大这一特点，所以可用来测量短时期内脉冲电流所迁移的电量，以及与此有关的其他测量，如磁感应强度、高阻、电容的测量等.

实验和理论都已得出以下结论：只要被测电量 q 瞬间全部通过冲击电流计，且 q 通过电流计后，电流计做的是周期性的弱衰减运动，那么，q 就与冲击电流计线圈的第一次偏转幅度值 φ 成正比，即

$$q = k\varphi \tag{3.13.1}$$

式中，k 为比例常数，常称为冲击电流计的冲击常数，在数值上它等于使冲击电流计偏转 1 个单位(1mm)所需要的电量值，其单位为 $\mathrm{C \cdot mm^{-1}}$. 对于已定的冲击电流计和电路，其 k 值是固定的.

(3.13.1)式便是冲击法测电量的基本公式.

应该指出，实际观测到的 N 值(厘米数)就是 φ 所对应的标尺上的读数值，即 φ 所对应的弧长值，因 $\phi \propto N$，故有 $q \propto N$.

2. 铁磁物质的磁化曲线

1) H、B 的测量原理

如图 3.13.2 所示，T 为一铁环，环的横截面的半径为 r. 环的半径为 R，且有 $2\pi R = L \gg r$. 在铁环上均匀、紧密地绕满 N_1 匝线圈，这就构成一个为铁心所充满的螺绕环. 如果线圈通过电流 I，则铁心中的磁场强度可根据安培环路定律得出

$$H = \frac{N_1}{L} I \tag{3.13.2}$$

铁心中的磁感应强度 B 可用冲击法测量. 为获取磁通量的变化量以测量 B，在磁环上绕了 N_2 匝副线圈.

2) 起始磁化曲线

铁磁质从没有被磁化的状态(即 $H=0$ 时，铁磁质的 $B=0$)开始，从零单调地增大磁场 H，求出相对应的 B，这样测绘出来的曲线称为起始磁化曲线，如图 3.13.3 所示. 由图

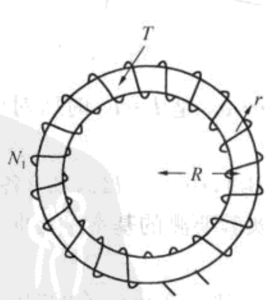


图 3.13.2

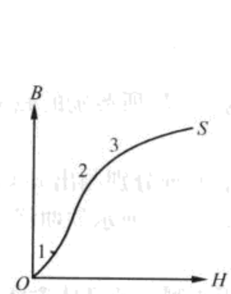


图 3.13.3

可见，铁磁质的 B 与 H 之间存在着非线性的关系.

3) "磁锻炼"过程获得闭合磁滞回线

如图 3.13.4 所示. 铁磁材料除了具有高的导磁率外，还有一个重要的特点就是磁滞. 当材料磁化时，磁感应强度不仅与当时的磁场强度 H 有关，而且与以前的磁化状态有关. 曲线 Oa 表示铁磁材料从没有磁性开始磁化，磁感应强度 B 随 H 增加，称为磁化曲线. 当 H 增加到某一值 H_m 时，B 的增加将极缓慢，和前段曲线相比，可看成 B 不再增加，即达到磁饱和. 磁性材料磁化后，如使 H 减小，B 将不沿原路退回，而是沿另一条曲线 ab 下降. 当 $H=0$ 时，$B=B_r$(表现出滞后现象)，这时的 B_r 称作剩余磁感应强度. 只有磁化场反向加到一定值 H_c 时，磁感应强度 B 才为零，H_c 称为矫顽力. 按照 H_c 的大小，可把磁性材料分为两类，H_c 较高的称为硬磁材料，反之称为软磁材料. 如果反向使磁化场达到 H_m，再逐渐减小到零，然后再从零增至 H_m，B 将随 H 而变化，从而形成一条磁滞回线. 要注意的是，反复磁化($H_m \to -H_m \to H_m$)的开始几个循环内，每个循环 B 和 H 不一定沿相同的路径进行，只有经过十几个反复磁化(称为"磁锻炼")以后，每次循环的回路才相同，形成一个稳定的磁滞回线. 只有经"磁锻炼"后所形成的磁滞回线，才能代表该材料的磁滞性质，这时的 B_r、B_m、H_c、H_m 才称为定值.

4) 基本磁化曲线及其测量

图 3.13.5 中的第一闭合磁滞回线(围最小面积的线圈)的顶点 a_1 所代表的磁状态是由 $I=I_1$ 所激励的. 当然 a_1 是磁锻炼后的磁状态.

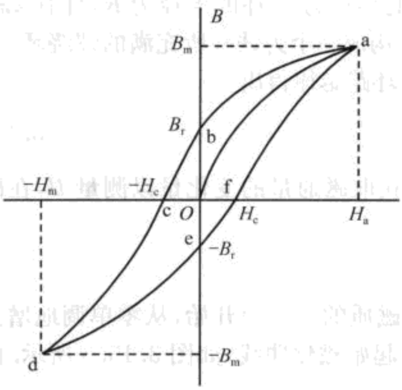


图 3.13.4

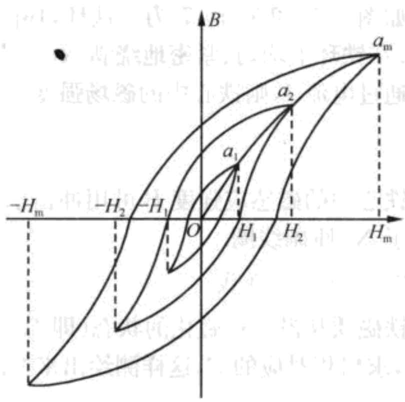


图 3.13.5

同理，a_2 为 $I=I_2$ 所激励的磁锻炼后的磁状态……a_m 是 $I=I_m$ 时所对应的磁锻炼后的饱和状态.

用前述 1 的原理分别测出 $a_1(H_1,B_1)$，$a_2(H_2,B_2)$，…，$a_m(H_m,B_m)$ 各点，然后把它们连接成如图 3.13.5 所示的曲线，这根曲线便是本实验要测的基本磁化曲线.

应该指出

(1) 由于所要测量的具体磁状态(例如 a_2 点)还与状态变化以前的"历史"有关，这就要求在测量曲线的操作过程中，磁化电流只能按照相应的规律变化.

(2) 由于磁化状态与温度有关，在测量系列点 $a_1,a_2,\cdots,a_m$ 的过程中，螺绕环的温度随通电时间的长短和电流大小而变化，因而其磁状态也会受温度变化的影响. 为减小这种影响带来的测量误差，最好是只在磁锻炼和测量 B 时才给螺绕环通电.

要做到以上两点，操作 K_2、K_3 必须得法(图 3.13.6).

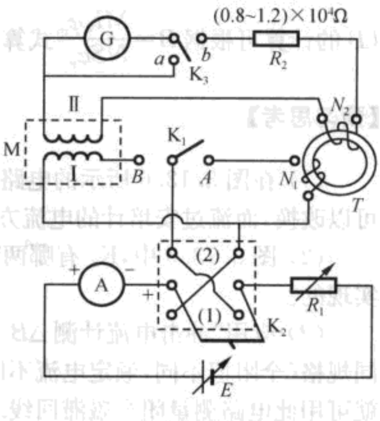


图 3.13.6

5) 去磁(退磁)

考虑到铁磁质有剩磁效应，而测基本磁化曲线时要求测量前必须使铁磁质处在 $H=0$、$B=0$，因此测基本磁化曲线之前，必须设法对铁磁质进行"去磁"，以使它处在无磁状态.

去磁的过程如下：将铁磁质放在方向不断交替变更、数值连续减小直至为零的磁场中，这一过程使得剩磁逐渐减小直至完全消失，对应的磁状态变化过程亦随之完全消失.

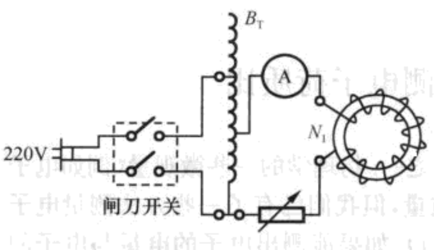


图 3.13.7

只要把螺绕环的原线圈 N_1 通以 50Hz 交流电，并使其电流值由 I_m(3.0A)逐渐减小至零，便可实现上述的去磁.

去磁电路如图 3.13.7 所示. 去磁的具体操作方法如下：将图 3.13.7 中的调压变压器的输出电压由零逐渐增大，使安培计的电流由零逐渐增至 3.0A，然后使输出电压逐渐减小至零(电流随之减小至零值).

【实验内容】

(1) 接好图 3.13.6 所示的测量电路，把仪器调整到待测安全态.

(2) 初步观测 G 的偏转情况，以检验仪器和电路是否正常工作. 为此：

① 把 K_1 接至 B 侧，调节 E 的输出值，使流过 M 的原线圈 I 的电流强度为 M 的电流额定值 0.13A)，然后把 K_2 反向，观测 G 的偏转，其 φ_{m0} 应在 10cm 范围内.

② 把 K_1 接至 A 侧，调节 E 的输出值，使流过 N_1 的电流为小 1.5A，然后把 K_2 反向，观测 G 的偏转，其 φ_{m0} 应在 15～22cm 范围内.

(3) 把螺绕环换接在图 3.13.7 中，对它进行退磁，退磁的最大电流不大于 3.0A.

(4) 测量 I_0 及其相对应的 φ_{m0}(K_1 接至 B 侧). 所取 I_0 略小于或等于 M 的额定电流值(0.13A).

(5) 依次测量 $a_1,a_2,\cdots,a_m$ 各点所需要选取的 I 值和所对应的 φ_m 值(K_1 接至 A 侧). 所需选取的 I 值分别为 $I_1=0.1\text{A},I_2=0.2\text{A},\cdots,I_m=1.5\text{A}$. 为了防止一接通电源电流就很大(远大于 0.1A)，在接通 I 之前，应先把电源 E 的输出电压调至最小.

(6) 记录 M 值和螺绕环的有关参数值，算出 $H_1,H_2,\cdots,H_m$ 和 $B_1,B_2,\cdots,B_m$ 的值

(B 的计算可根据 $B=\dfrac{MI_0\varphi_m}{NS\varphi_{m0}}$ 式算出). 列出表格,用坐标纸绘制基本磁化曲线.

【预习思考】

(1) 在图 3.13.6 所示的电路中,采用了什么器件和方法使得流过螺绕环的电流方向可以改换,而流过安培计的电流方向保持不变?

(2) 图 3.13.6 中,K_2 有哪两种操作功能? 这两种功能实际上是通过 K_2 改变什么来实现的?

(3) 应用"冲击电流计测 ΔB 来测 B"的原理,把图 3.13.6 电路中的 R_1 改换成三个不同规格(全阻值不同,额定电流不同)的滑线电阻相串联,并分别配上能使其短路的开关,就可用此电路测量闭合磁滞回线. 想一想,其测量方法是怎样的?

【习题】

测量磁滞回线时为什么要进行磁锻炼? 如果测量磁滞回线过程中一旦操作顺序发生错误,应该怎样操作才能继续测量?

实验 3.14　用磁聚焦法测电子荷质比

测量某些基本物理常量是物理实验的重要任务之一. 物理学的一些微观量(例如电子的质量)非常小,很难用直接测量的方法测出它的质量,但我们已有了一些方法测量电子的电量,如密立根油滴实验所采用的方法(实验 5.11). 如果能测出电子的电量与电子的质量的比值 e/m(称为电子的荷质比),就可间接测出电子的质量. 我们常用的电子的"静止质量"就是这样测出来的. 测量电子荷质比的方法很多. 如汤姆孙法、滤速器法、磁控管法等. 本实验介绍的是用纵向磁聚焦法测定电子荷质比.

【实验目的】

(1) 了解电子在电场和磁场中的运动规律.

(2) 学习用磁聚焦法测量电子的荷质比.

【实验器材】

DHB-2 电子荷质比测定仪(主要由直流稳压电源、一台荷质比测定仪、一个长直螺线管和放置在螺线管内的一个示波管组成)、双刀开关.

【实验原理】

磁聚焦法测定电子荷质比的基本实验电路图如图 3.14.1 所示. 当螺线管通有直流电时,管内磁感应强度 B 的方向沿螺线管的轴线方向,电子枪发射的电子也基本上沿着螺线管的轴线方向飞行.

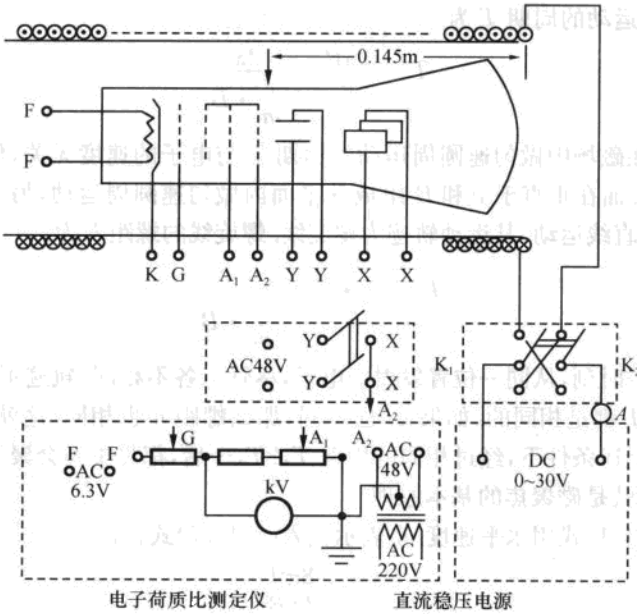


图 3.14.1

由阴极发射的电子，在阳极的作用下获得了动能，根据动能定理，有

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU$$

即

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} \tag{3.14.1}$$

电子离开第二阳极后做匀速运动，一直到达荧光屏. 当螺线管通有直流电时，螺线管内产生磁场，其磁感应强度 B 的方向，沿着螺线管的方向. 电子在磁场中运动，其运动方向如果同磁场方向平行，则电子不受任何影响；如果电子运动方向与磁场方向有一角度 θ，则电子要受到洛伦兹力的作用，所受洛伦兹力为

$$\boldsymbol{F} = -e\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B} \tag{3.14.2}$$

其大小为

$$F = -ev \cdot B\sin\theta \tag{3.14.3}$$

我们把运动速度分解成两个方向的速度：与磁感应强度平行的速度 $v_{/\!/}$ 和与磁感应强度垂直的速度 $v_\perp$. 与磁感应强度平行的速度 $v_{/\!/}$ 不受洛伦兹力的影响，继续沿轴线做匀速直线运动. 与磁感应强度垂直的速度 $v_\perp$，在洛伦兹力的作用下做匀速圆周运动，其方程为

$$F = ev \cdot B = \frac{mv^2}{R} \tag{3.14.4}$$

运动半径为

$$R = \frac{v}{\frac{e}{m} \cdot B} \tag{3.14.5}$$

电子做匀速圆周运动的周期 T 为

$$T=\frac{2\pi R}{v}=\frac{2\pi}{\frac{e}{m}\cdot B} \tag{3.14.6}$$

上式表明，电子在磁场中做匀速圆周运动的周期 T 与电子的速度无关，仅与磁感应强度 B 有关. 电子一方面在垂直于 v 和 B 组成的平面内做匀速圆周运动，另一方面又沿螺线管的轴线做匀速直线运动，其运动轨迹为螺旋线. 螺旋线的螺距 h 为

$$h=v_{/\!/}\cdot T=\frac{2\pi v_{/\!/}}{\frac{e}{m}\cdot B} \tag{3.14.7}$$

这表明，对于同一时刻，从同一位置发射的电子，尽管 v 各不相同，轨迹不同，但只要 B 一定，它们的周期 T 都是相同的. 如果 $v_{/\!/}$ 也相同，那么螺距 h 也相同. 这就是说，从同一点发射的电子，在上述条件下，经过相同的周期 $T,2T,\cdots$后，都将重新会聚于距出发点为 h，$2h,\cdots$的位置，这就是磁聚焦的基本原理.

我们将(3.14.1)式用水平速度 $v_{/\!/}$ 表示代入(3.14.7)式，有

$$\frac{e}{m}=\frac{8\pi^2 U}{h^2B^2} \tag{3.14.8}$$

螺线管中磁感应强度的计算公式用 $B=\dfrac{\mu_0 NI}{\sqrt{L^2+D^2}}$ 表示，代入(3.14.8)式，得

$$\frac{e}{m}=\frac{8\pi^2(L^2+D^2)}{(\mu_0 Nh)^2}\cdot\frac{U}{I^2}=\frac{(L^2+D^2)}{2\times10^{-14}N^2h^2}\cdot\frac{U}{I^2} \tag{3.14.9}$$

式中，$\mu_0=4\pi\times10^{-7}\,\mathrm{H\cdot m^{-1}}$，$N$ 为螺线管的总匝数，L、D 分别为螺线管的长度和直径，h 为示波管 Y 偏转板靠近电子枪一端与荧光屏的距离(即一次聚焦的距离). 测出与 U 相应的聚焦电流 I，即可求得电子的荷质比.

【实验内容】

(1) 按图 3.14.1 接好线路.

(2) 接通电子荷质比测定仪电源，预热 3min，粗调阳极电压至 700V.

(3) 将偏转信号双刀开关倒向接地端(即 X 端)，使 X、Y 两对偏转板及 A_2 都接地. 使电子只获得加速电压 U 而无偏转板上的交流电压，此时荧光屏上出现一个亮斑.

(4) 调节聚焦和亮度，使光斑聚焦到一点，亮度要适当.

(5) 调节阳极电源细调旋钮，使阳极电压准确指示为 700V.

(6) 将偏转信号双刀开关倒向另一端，交流信号 AC 48V 端接入，使交流信号加到 Y 偏转板上，荧光屏上出现一条直线.

(7) 将直流稳压电源接通，电压先调到最小.

(8) 将螺线管直流换向双刀开关倒向一边，调节磁化电流至 1.5A，预热 3min，然后正式测试.

(9) 先将磁化电流调回到零，然后由小到大调节磁化电流，荧光屏上的直线随着电流的增大一面旋转，一面缩短，直至会聚成一个光点. 稳定半分钟后，读取数据，记入表中.

(10) 将螺线管的磁化电流调回到零，将换向开关倒向另一边，由小到大调节磁化电流. 屏上直线反向旋转，再次会聚成一点，读取伏特计、安培计读数，记入表中.

(11) 依次测出 700V、750V、800V、850V、900V、950V 时对应的磁化电流，记入表 3.14.1 中，由(3.14.9)式计算出 e/m 的值.

表 3.14.1

	700V	750V	800V	850V	900V	950V
$+I$						
$-I$						
$\bar{I}$						
U/I^2						
e/m						
$\overline{e/m}$						

【注意事项】

(1) 示波管电源高压达 1000V，实验者应特别注意安全.

(2) 调节亮度之后，高压会有变化，需要再次调节高压细调，才能达到所需值.

(3) 实验完毕，关掉电源，不要立即拆除线路，要等电容器放电完毕（约 5min）后，再拆除线路.

【预习思考】

(1) 查阅资料，了解测量 e/m 有多少种方法. 不同方法测得的 e/m 值可分别达到几位有效数字？

(2) 本实验用什么方法能使得电子束偏转和电子束聚焦？

【习题】

(1) 当偏转板上加交流信号时．荧光屏上出现一条直线，这表明什么？

(2) 能否就用这套仪器，采用另一种方法测出电子的荷质比？试简述其方法.

实验 3.15 霍尔效应

1879 年德国物理学家霍尔（E. H. Hall）在读研究生期间发现，通电的板状金属导体如果在其电流垂直方向上加一水平方向的匀强磁场，因为定向移动的自由电子受到洛伦兹力发生偏转，会在导体上下表面间产生一个电势差，这种现象称为霍尔效应，此电势差称为霍尔电势差（Hall voltage）. 当时人们还不知道金属的导电机制，甚至还未发现电子，因此根据霍尔电势差的方向，可以判断出导体载流子的正负（这也正是霍尔当时设计实验的目的）. 这在物理学的发展史上有着重要的作用. 后来发现，半导体材料的霍尔效应更为显著. 现在霍尔效应已是研究半导体材料物理和电学性能的最基本、最重要的实验手段

之一.

霍尔效应的应用非常广泛,不仅可以测量各种磁场,还可用于测量电流强度和功率、交直流信号转换、对各种物理量进行四则或乘方开方运算等.本实验主要介绍利用霍尔效应测量磁感应强度(或霍尔系数).具有霍尔效应功能的元件称为霍尔元件,它在测量中具有频率响应宽(从直流到微波)、可靠、小型、测量时无接触、使用寿命长和成本低等优点,目前在测量技术、自动控制、计算机和信息技术等方面仍被广泛应用.

【实验目的】

(1) 了解霍尔效应的原理以及霍尔元件有关参数的含义和作用.

(2) 测绘霍尔元件的 U_H-I_S、U_H-I_M 曲线,了解霍尔电压 U_H 与霍尔元件工作电流 I_S、励磁电流 I_M 之间的关系.

(3) 学习利用霍尔效应测量电磁铁气隙中的磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 及磁场分布.

(4) 学习用"对称交换测量法"消除副效应产生的系统误差.

【仪器介绍】

实验系统由霍尔效应实验仪、霍尔效应测试仪两大部分组成.

1. 霍尔效应实验仪

包括电磁铁、霍尔样品、样品架、换向开关等.

(1) 电磁铁:规格 $N>2500\text{Gs/A}(1\text{Gs}=10^{-4}\text{T})$,根据励磁电流 I_M 的大小和方向可确定磁场强度的数值和方向.

(2) 样品和样品架:样品材料为半导体硅,厚度 $d=0.20\text{mm}$,宽度 $b=4.00\text{mm}$,A、C 电极间的间距 $L=5.00\text{mm}$. 如图 3.15.1 所示.

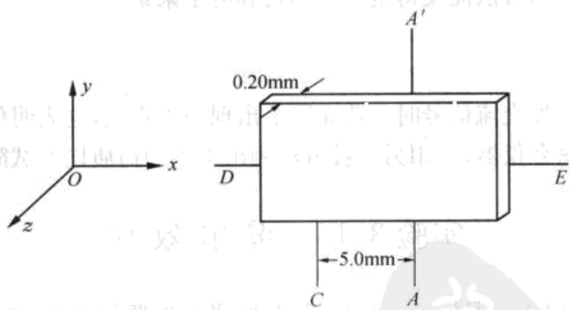


图 3.15.1

(3) I_S 和 I_M 换向开关以及 U_H 和 U_σ(即 U_{AC})测量选择开关.

2. 测试仪

(1) 0~1A 的励磁电源 I_M 和 0~10mA 的样品工作电源 I_S,两组电源均连续可调,I_S 和 I_M 用同一只数字表测量.

(2) 0～20mV数字电压表，用来测量U_H和U_σ.

3. 使用说明

(1) 测试仪面板上的"I_S输出"、"I_M输出"和"U_H输入"三对接线柱分别与实验仪上的三对相应的接线柱相连接：

① 测试仪面板右下方供给励磁电流I_M(0～1000mA)的直流恒流源输出端(I_M输出)接实验仪上电磁铁线圈电流的输入端；

② 测试仪面板左下方供给霍尔元件控制(工作)电流I_S的直流恒流源(0～10mA)输出端(I_S输出)接实验仪上霍尔元件工作电流输入端；

③ 实验仪上霍尔电压U_H输出端接测试仪中部下方的霍尔电压输入端(U_H输入).

(2) 开机前将I_S、I_M调节旋钮逆时针方向旋到底，使I_S、I_M输出均为000.

(3) "I_S调节"和"I_M调节"两旋钮分别控制样品工作电流和励磁电流大小，其电流值随旋钮顺时针方向旋转而增加，调节精度分别为10μA和1mA，I_S和I_M的读数可通过"测量选择"按键开关来实现.

(4) 关机前，将I_S、I_M调节旋钮逆时针方向旋到底，此时，数显窗读数为"000"，然后切断电源.

【实验原理】

1. 霍尔效应及相关参数的测量原理

霍尔效应从本质上讲是运动的带电粒子在磁场中受洛伦兹力作用而引起的偏转. 当带电粒子(电子或空穴)被约束在固体材料中，这种偏转就导致在垂直电流和磁场的方向上产生正负电荷的积累，从而形成附加的横向电场.

如图3.15.2所示，把一载流导体板垂直于磁场$\boldsymbol{B}$放置，如果磁场$\boldsymbol{B}$垂直于导体板中电流I_S，那么在导体中垂直于$\boldsymbol{B}$和I_S的方向就会出现一定的电势差U_H，这一现象叫做霍尔效应，U_H叫做霍尔电势差(或霍尔电压).

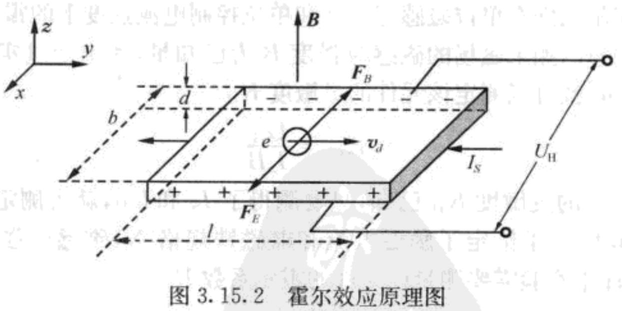


图3.15.2 霍尔效应原理图

本实验用N型半导体(其载流子为电子)，设它的长为l，宽为b，厚为d. 沿z轴正向加一磁场$\boldsymbol{B}$，沿y轴正向通一工作电流I_S，半导体中的载流子将在x方向受到洛伦兹力的作用(图3.15.2)

$$\boldsymbol{F}_B = e\boldsymbol{v}_d \times \boldsymbol{B} \tag{3.15.1}$$

式中，e、$\boldsymbol{v}_d$ 分别为载流子的电量和平均漂移速度. 载流子受力偏转的结果是在 x 方向形成霍尔电势差 U_H(此过程大约在 10^{-13}～10^{-11} s 内就完成)，从而形成一个霍尔电场 $\boldsymbol{E}_H$. 由于霍尔电场对载流子的作用力 $\boldsymbol{F}_E$ 总是与 $\boldsymbol{F}_B$ 的方向相反，所以，当 $\boldsymbol{F}_E=-\boldsymbol{F}_B$ 时，载流子的聚集就达到动态平衡. 电场力的大小为

$$F_E = eE_H = \frac{eU_H}{b} \tag{3.15.2}$$

设霍尔元件中载流子的浓度为 n，则电流强度为 $I_S=env_dbd$，因此有

$$v_d = \frac{I_S}{enbd} \tag{3.15.3}$$

于是洛伦兹力的大小可表示为

$$F_B = ev_dB = \frac{I_SB}{nbd} \tag{3.15.4}$$

由 $F_B=F_E$ 可得

$$U_H = \frac{I_SB}{ned} \tag{3.15.5}$$

令

$$R_H = \frac{1}{ne} \tag{3.15.6}$$

R_H 称为霍尔系数，它是反映半导体材料霍尔效应强弱的重要参数. 于是有

$$U_H = \frac{R_H I_S B}{d} \tag{3.15.7}$$

若令

$$K_H = \frac{R_H}{d} = \frac{1}{ned} \tag{3.15.8}$$

则有

$$U_H = K_H I_S B \tag{3.15.9}$$

K_H 称为霍尔灵敏度，对一定的霍尔元件是一个常数. 它的大小与材料的性质和元件的尺寸有关，它表示霍尔元件在单位磁感应强度和单位控制电流强度下的霍尔电压的大小.

利用(3.15.9)式，如果磁场的磁感应强度 B 为已知量，测出通过霍尔元件的工作电流 I_S 和相应的 U_H，就可以测定该元件的灵敏度 K_H

$$K_H = \frac{U_H}{I_SB}$$

反之，如果霍尔元件的灵敏度 K_H 已知，只要测得了 I_S 和 U_H，就可测定霍尔元件所在处的磁场 B. 本实验中由于给定了励磁电流和电磁铁规格 N，磁感应强度可看成已知量($\boldsymbol{B}=\boldsymbol{I}_M\times\boldsymbol{N}$)，因此本实验需要测量该元件的霍尔系数 R_H

$$R_H = \frac{U_H d}{I_S B} \times 10^4 \tag{3.15.10}$$

注意：上述要求各参数的单位为 $R_H(\text{cm}^3\cdot\text{C}^{-1})$、$d$(cm)、$B$(T)、$I$(A)、$U_H$(V).

由(3.15.6)式可知，霍尔系数 R_H 与载流子的浓度 n 成反比，由于半导体中载流子的浓度小于金属，所以半导体的霍尔效应比金属显著. 又由(3.15.6)式和(3.15.7)式有

$$n = \frac{I_S B}{edU_H} \tag{3.15.11}$$

因此知道了 U_H、I_S、B、d 就可以计算出该材料的载流子浓度.

如果半导体为N型(载流子为电子),则 K_H 为负,U_H 也为负;若半导体为P型半导体(载流子为空穴),K_H 为正,U_H 也为正.因此,利用霍尔系数的正、负可以判断半导体的导电类型.如果知道了载流子的类型,就可以由 U_H 的正、负确定磁场的方向.

2. 霍尔元件中的副效应及其消除方法

实际测量过程中,在产生霍尔效应的同时,还会伴随着一些副效应,它使所测得的电压不只是 U_H,还会附加另外一些电压,给测量带来误差.下面首先分析这些电压产生的原因及特点,然后探讨其消除方法.

1) 不等位电势差 U_0

由于制作时,两个霍尔电极不可能绝对对称地焊在霍尔片的两侧、霍尔片电阻率不均匀、工作电流极的端面接触不良都可能造成两极焊接点不在同一等位面上,此时虽未加磁场,但两接点间存在电势差 U_0,$U_0 = I_S R$,R 是两等位面间的电阻,由此可见,在 R 确定的情况下,U_0 与 I_S 的大小成正比,且其正负随 I_S 的方向面改变.

2) 埃廷斯豪森(Ettingshausen)效应

从微观来看,当霍尔电压达到一个稳定值 U_H 时,速度为 v 的载流子的运动达到动态平衡.但从统计的观点看,元件中速度大于 v 和小于 v 的载流子也有.因速度大的载流子所受的洛伦兹力大于电场力,而速度小的载流子所受的洛伦兹力小于电场力,因而速度大的载流子会聚集在元件的一侧,而速度小的载流子聚集在另一侧,又因速度大的载流子的能量大,所以有快速粒子聚集的一侧温度高于另一侧.由于霍尔电极和霍尔元件两者材料不同,电极和元件之间形成温差电偶,这一温差产生温差电动势 U_E,这种由于温差而产生电势差的现象称为埃廷斯豪森效应.$\boldsymbol{U}_E$ 的大小和正负号与 $\boldsymbol{I}_S$、$\boldsymbol{B}$ 的大小和方向有关,跟 $\boldsymbol{U}_H$ 与 $\boldsymbol{I}_S$、$\boldsymbol{B}$ 的关系相同,所以不能在测量中消除.

3) 能斯特(Nernst)效应

在元件上接出引线时,不可能做到接触电阻完全相同.当工作电流 I_S 通过不同接触电阻时会产生不同的焦耳热,并因温差产生一个温差电动势,此电动势又产生温差电流 Q(称为热电流),热电流在磁场的作用下将发生偏转,结果产生附加电势差 U_N,这就是能斯特效应.它与电流 I_S 无关,只与磁场 $\boldsymbol{B}$ 有关.

4) 里吉-勒迪克(Righi-Leduc)效应

由能斯特效应产生的热电流也有埃廷豪斯森效应,由此而产生附加电势差 U_R,称为里吉-勒迪克效应.U_R 与 I_S 无关,只与磁场 $\boldsymbol{B}$ 有关.

因此,在确定磁场 $\boldsymbol{B}$ 和工作电流 I_S 的条件下,实际测量的电压包括 U_H、U_0、U_E、U_N、U_R 五个电压的代数和.为了减少和消除以上效应引起的附加电势差,利用这些附加电势差与霍尔元件工作 I_S、励磁电流 I_M 的关系,采用对称(交换)测量法进行测量.测量时可用改变 I_S 和 $\boldsymbol{B}$(励磁电流 I_M)的方向的方法,抵消副效应的影响.例如,测量时首先任取某

一方向的 I_S 和 I_M 为正，用 $+I_M$、$+I_S$ 表示，当改变它们的方向时为负，用 $-I_M$，$-I_S$ 表示，保持 I_S、$\boldsymbol{B}$ 的数值不变，在 $(+I_M, +I_S)$、$(-I_M, +I_S)$、$(-I_M, -I_S)$、$(+I_M, -I_S)$ 四种条件进行测量，测量结果分别为

当 $+I_M$、$+I_S$ 时，$U_1=U_H+U_0+U_E+U_N+U_R$

当 $-I_M$、$+I_S$ 时，$U_2=-U_H+U_0-U_E-U_N-U_R$

当 $-I_M$、$-I_S$ 时，$U_3=U_H-U_0+U_E-U_N-U_R$

当 $+I_M$、$-I_S$ 时，$U_4=-U_H-U_0-U_E+U_N+U_R$

从上述结果中消去 U_0、U_N 和 U_R，得到

$$U_H=\frac{1}{4}(U_1-U_2+U_3-U_4)-U_E\approx\frac{1}{4}(U_1-U_2+U_3-U_4)$$

一般地 U_E 比 U_H 小得多，在误差范围内可以忽略不计.

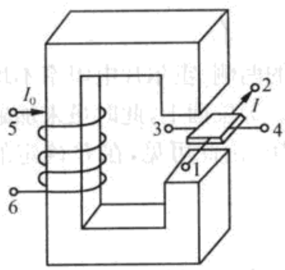


图 3.15.3

【实验内容】

1. 测绘 U_H-I_S 曲线

将霍尔元件调至电磁铁气隙内的中心位置(图 3.15.3)，将 K_1、K_2、K_3 电键均倒向下方接通电路(此时为“+”). 保持励磁电流 $I_M=450\text{mA}$ 不变，改变工作电流，调节 $I_S=1.00\text{mA}$、1.50mA、2.00mA、2.50mA、3.00mA、3.50mA、4.00mA、4.50mA，并分别改变 $\boldsymbol{B}$、I_S 的方向，测出相应的霍尔电势差 U_H，填入表 3.15.1 中. 根据测量数据绘出 U_H-I_S 曲线，验证线性关系.

表 3.15.1 ($I_M=450\text{mA}$)

I_S/mA	U_1/mV	U_2/mV	U_3/mV	U_4/mV	$U_H=\frac{U_1-U_2+U_3-U_4}{4}$/mV
	$+I_M+I_S$	$-I_M+I_S$	$-I_M-I_S$	$+I_M-I_S$	
1.00					
1.50					
2.00					
2.50					
3.00					
3.50					
4.00					
4.50					

2. 测绘 U_H-I_M 曲线

霍尔元件仍位于气隙的中心，保持工作电流 $I_S=6.00\text{mA}$ 不变，调节 $I_M=100\text{mA}$、150mA、200mA、250mA、300mA、350mA、400mA、450mA，分别测量霍尔电压 U_H，填入表 3.15.2 中，并绘出 U_H-I_M 曲线，验证线性关系范围，分析当 I_M 达到一定值以后，U_H-I_M 直线斜率变化的原因.

表 3.15.2 ($I_S=6.00$mA)

I_M/mA	U_1/mV	U_2/mV	U_3/mV	U_4/mV	$U_H=\frac{U_1-U_2+U_3-U_4}{4}$/mV
	$+I_M+I_S$	$-I_M+I_S$	$-I_M-I_S$	$+I_M-I_S$	
100					
150					
200					
250					
300					
350					
400					
450					

3. 测量电磁铁气隙的磁场分布

将霍尔元件置于电磁铁气隙的中心，调节 $I_M=600$mA、$I_S=10.00$mA. 使霍尔元件从中心向边缘移动，每隔 5mm 选一个点测出相应的霍尔电压 U_H，填入表 3.15.3，描绘出 B-x 曲线.

表 3.15.3 ($I_M=450$mA、$I_S=6.00$mA)

x/mm	U_1/mV	U_2/mV	U_3/mV	U_4/mV	$U_H=\frac{U_1-U_2+U_3-U_4}{4}$/mV
	$+I_M+I_S$	$-I_M+I_S$	$-I_M-I_S$	$+I_M-I_S$	
5					
10					
15					
20					
25					
30					
35					
40					

4. 判断样品的导电类型，并计算 R_H、n、μ、σ，填入表 3.15.4 中

表 3.15.4

R_H	R_H	n	μ	σ

【注意事项】

(1) 霍尔元件及二级移动易折断、变形，要注意保护，应避免挤压、碰撞等，不要用手触摸霍尔元件.

(2) 实验中应使霍尔元件平面与磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 垂直，此时 $U_H=I_SB\cos\theta=I_SB$，即 U_H

取最大值.

(3) 实验前应将霍尔元件移至电磁铁气隙的中心，调整霍尔元件方位，使其在 I_M、I_S 相同时，达到 U_H 输出最大.

(4) 霍尔元件的工作电流引线与霍尔电压引线不能接错；霍尔元件的工作电流和螺线管的励磁电流要分清，否则会烧坏霍尔元件.

(5) 为了不使电磁铁过热而受到损害，影响测量的精度，除读取有关数据的短时间内通以励磁电流 I_M 外，其余时间要断开励磁电流开关.

【预习思考】

(1) 若磁场与霍尔元件不垂直，能否准确测出磁场？

(2) 怎样减小或消除实验中附加电压所产生的影响？

(3) 温度和磁场大小对 U_H-I_S 和 U_H-I_M 之间的关系有影响吗？本实验对温度和磁场有要求吗？

(4) 能否用交流电供电，为什么？

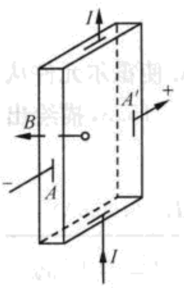


图 3.15.4

【习题】

(1) 若磁场 $\boldsymbol{B}$ 的方向不与霍尔片的法线一致，对测量结果 R_H、n、μ、σ 会有何影响？

(2) 设霍尔片上的 I_S，$\boldsymbol{B}$ 的方向及 $U_{AA'}$ 的极性如图 3.15.4 所示，试问该霍尔片是 N 型还是 P 型半导体材料？

第 4 章 光学实验

4.0 光学实验基本知识

光学是物理学中一门重要的分支学科，光学实验方法和光学仪器在科研、生产、国防等部门应用十分广泛. 例如，它可将像放大、缩小或记录存储，可实现非接触的高精度测量，利用光谱仪可研究原子、分子、原子核的结构，测量各种物质的成分和含量等. 特别是20 世纪 60 年代激光问世以来，随着激光科学技术的发展，现代光学与电子技术密切配合，科学研究和精密测量中越来越多地应用光学方法和仪器. 激光已广泛应用于材料加工、精密测量、远距离测距、全息检测、通信、医疗及农作物育种等方面. 光学纤维已经发展成为一种新型的光学元件，为光学窥视和光通信的实现创造了条件. 许多现代化的精密光学仪器的出现，不但促进了光学学科自身的进展，而且也为其他学科的发展，如天文学、化学、生物和医学提供了重要的实验手段. 应该看到，光学技术正发挥着日益巨大的作用.

为了使同学们更有效地进行光学实验，提高学习效果，特将一些光学的基本知识和实验的基本要求写在前面，供同学们阅读，以期达到指导光学实验的目的.

4.0.1 实验室常用光源

光源的种类极其繁多，目前实验室中常用的光源多属于电光源，它是利用电能转换为光能的光源. 电光源按其从电能到光能的转化形式来区分，大致可分为两类：第一类是热辐射光源，即依靠电流通过物体，使物体温度升高而发光的光源，如白炽灯；第二类是气体放电光源，即依靠电流通过气体（包括某些金属蒸气），使气体放电而发光的光源，如汞灯、钠光灯、氦灯等.

除电光源外，激光光源（如 He-Ne 激光器）和固体发光光源（如发光二极管）也是实验室常用的.

1. 白炽灯

白炽灯是根据热辐射原理制成的. 灯泡内充以惰性气体. 当灯泡的钨丝两端加上适当的电压后，由于电流的热效应，钨丝受热至白炽而发光. 白炽灯发出的光，其光谱为连续谱，光谱成分和光强与钨丝加热的温度有关.

在钨丝灯泡内加入微量的碘或溴制成的碘钨灯和溴钨灯，利用卤钨循环原理能更有效地抑制钨的蒸发，提高发光效率. 从灯丝蒸发出来的钨与卤族元素反应形成卤钨化合物，当卤钨化合物扩散到炽热的灯丝周围时，又分解成卤族元素和钨，钨又重新沉积到灯丝上去，这样就控制了钨丝的蒸发，大大提高了发光效率，也延长了使用寿命.

根据不同的用途，白炽灯在制造上有不同的要求. 例如，“仪器灯泡”对灯丝的形状及

分布位置有较高的要求，对透明外壳也有一定的要求；而普通灯泡要求较低. 实验室常用的白炽灯除照明灯泡和暗室用的有色灯泡外，还有以下几种：

(1) 小电珠. 规格有 6.3V、6～8V、几瓦等，作白光光源或读数照明用. 它通过灯丝变压器点燃. 这种灯泡寿命短，不用时应立即切断电源.

(2) 金属卤素灯(如溴钨灯). 它是一种高亮度的白光点光源，也作强光源使用. 常用的规格有 12V/100W、24V/300W 等. 它通过控制变压器或行灯变压器点燃.

(3) 各种仪器灯泡. 一般为 8V、几十瓦，作白光光源用. 它通过电源变压器点燃. 不同类型的仪器上使用的灯泡通常不一样，更换时应注意灯泡型号.

(4) 钨带灯、钨丝灯. 由于其工作状态较为稳定，寿命较长，用黑体辐射源校准后，在光度学测量中，常作为光强标准灯和光通量标准灯. 此时，对电源要求较高，必须使用稳压或稳流电源供电.

2. 气体放电灯

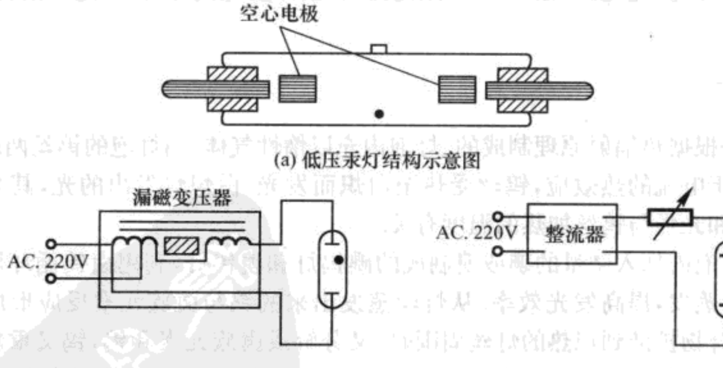
气体放电灯中用得较多的是辉光放电灯和弧光放电灯两类. 它们的结构原理基本相同，一般由泡和电极组成，泡壳内充以某种气体. 泡壳由透明的玻璃或石英按照所需形状经吹制加工而成. 由直流电供电的电极分阳极和阴极(交流工作时，两极交替作阳、阴极使用).

发光的基本过程是：由热阴极或冷阴极发射电子并被外电场加速；高速运动的电子与气体原子碰撞时，电子的动能就转移给气体原子使其激发；当受激原子返回基态时，所吸收的能量又以辐射(发光)形式释放出来. 电子的不断产生和被电场加速，就使发光过程不断地进行下去，根据所充气体的类别而发射其特有的原子光谱或分子光谱. 下面介绍几种常用的气体放电灯.

1) 汞灯

汞灯又称水银灯，其发光物质是汞蒸气. 它的放电状态是弧光放电. 按照光源稳定工作时灯泡内所含汞蒸气气压的高低，可分为低压汞灯、高压汞灯和超高压汞灯三种.

(1) 低压汞灯. 低压汞灯的汞蒸气通常在一个大气压以下，在管两端装有电极，其结构如图 4.0.1(a)所示. 在汞蒸气压比较低时，汞原子被激发到 6^3P_1 能级的机会最多，当返



(a) 低压汞灯结构示意图

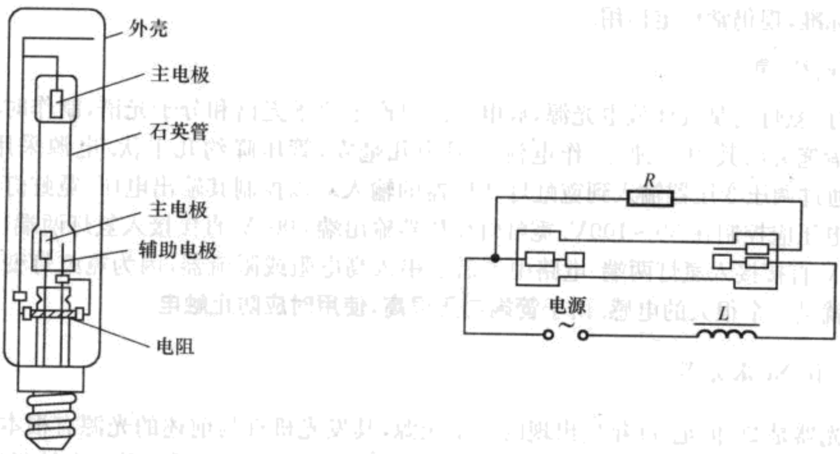
(b) 交流应用电路　　(c) 直流应用电路

图 4.0.1

回基态 6^1S_0 时，汞原子发射出波长为253.7nm的光. 当汞蒸气压为 6×10^{-3} mmHg时，这一波长的辐射效率最大，可达输入电能的60%，故低压汞灯辐射能量几乎集中在253.7nm这一谱线上，它一般作紫外光源使用.

低压汞灯应用交流电源工作时(图4.0.1(b))，需用一漏磁变压器限制其工作电压和工作电流. 而应用直流电源工作时，其电路如图4.0.1(c)所示，整流器输出电压约700V，电路中串联一电阻，以稳定和限制其工作电流，使电弧稳定.

(2) 高压汞灯. 高压汞灯的汞蒸气压一般从几个大气压到25个大气压，因而大大提高了灯的亮度，激发更多的谱线. 高压汞灯的结构如图4.0.2(a)所示，在真空的圆柱形石英管的两端各有一主电极，在一个主电极旁还有一辅助电极. 主电极上涂有氧化物以使其易于放出热电子. 在石英管外还有一硬质玻璃外壳起保护作用. 管内充有汞和少量辅助气体(如氖、氩)等. 高压汞灯的工作电路如图4.0.2(b)所示. 辅助电极通过一只高电阻 R 与不相邻的主电极相接. 当汞灯接入电路后，辅助电极与相邻主电极间有220V的交流电压. 由于此两电极距离很近，在强电场作用下，产生辉光放电，放电电流由电阻 R 限制. 辉光放电产生大量的带电粒子，在两主电极电场作用下产生高气压的弧光放电，当汞全部蒸发后才开始稳定，灯管正常发光.

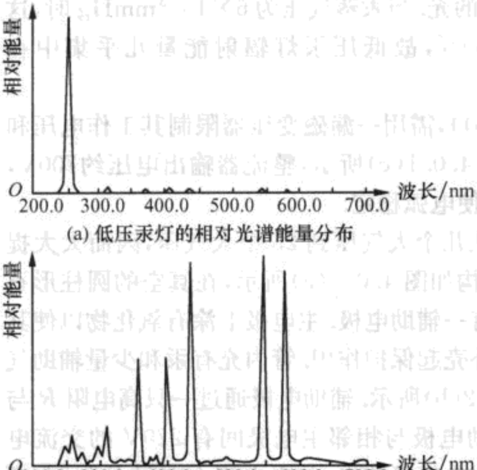


(a) 高压汞灯结构　　(b) 高压汞灯工作电路

图4.0.2

使用高压汞灯时，应根据灯管工作电流选用适当的限流器，以稳定工作电流. 汞灯从启动到正常工作需要预热时间5～10min. 高压汞灯熄灭后，因灯管仍然发烫，内部仍保持较高的汞蒸气压，要等灯管冷却汞蒸气压降低到一定程度后才能再次点燃，冷却过程亦需要5～10min. 高压汞灯在紫外、可见和红外区域都有辐射. 图4.0.3(a)和图4.0.3(b)分别为低压汞灯和高压汞灯的相对光谱能量分布. 在高压汞灯的总辐射中约有37%是可见光，其中一半以上集中在汞的绿线546.1nm和黄线577.0nm、579.1nm，都接近视函数的最大值. 因此，高压汞灯是光学实验和光谱分析中比较理想的光源.

汞灯辐射紫外线较强，为防止眼睛受伤，不要直视.



(a) 低压汞灯的相对光谱能量分布

(b) 高压汞灯的相对光谱能量分布

图 4.0.3

2）钠光灯

钠光灯的光谱在可见光范围内有两条波长分别为 589.0nm 和 589.6nm 的强谱线. 在很多仪器中，两条谱线不易分开，把它作单色光源使用，取它们的平均值 589.3nm 作单色光波长.

钠光灯是将金属钠封闭在抽空的放电管内，管中充以少量辅助气体氩、氖. 其工作原理与汞灯相似，都是金属蒸气弧光放电. 钠光灯电源采用 220V(A. C)并串入一适当规格的限流器(扼流圈).

如同上述电弧灯一样，在灯泡内充以其他金属蒸气，如镉、铊、铯、钾等，就可制成各种金属蒸气弧光灯. 镉(弧)灯有一条很细锐的红色特征谱线 643.846 96nm，曾作为波长的原始标准，现仍常作定标用.

3）氢灯、氦灯

氢灯、氦灯也是气体放电光源，放电时同时产生原子光谱和分子光谱，制作时根据需要采取措施突出其中一种. 工作电流一般为几毫安，管压降约几千伏. 电源采用 220V (A. C)通过调压变压器输入到霓虹灯变压器的输入端以控制其输出电压. 霓虹灯变压器的输入电压应控制在 50～100V. 霓虹灯变压器输出端 8000V 直接接入氢灯两端，而输出端 5000V 直接接入氦灯两端. 电路中不需要串入高电阻或限流器，因为霓虹灯变压器次级线圈就是一个很大的电感. 由于**管端电压很高，使用时应防止触电**.

3. He-Ne 激光器

激光器是 20 世纪 60 年代出现的新型光源，其发光机理与前述的光源有根本上的区别. 激光器是受激发射而发光，普通光源是自发辐射而发光. 激光是一种方向性很好(发散角很小)、单色性好、亮度高、空间相干性高的光源. 因此，实验室常用它作强的定向光源和单色光源. 其中最常用的激光器是 He-Ne 激光器，它发出的激光波长为 632.8nm.

He-Ne 激光器由激光电源和 He-Ne 激光管两部分组成. 激光管是一个气体放电管(图 4.0.4)，管内充有氦、氖混合气体，两端用镀有多层介质膜的反射镜封固，构成谐振腔. 光在两镜面间多次反射，形成持续振荡. 有的激光管将反射镜安装在管外，以便于调节与更换. 如果使放电管的窗口与管轴成布儒斯特角，则发出的光是线偏振光.

He-Ne 激光管所用高压直流电源的要求与管长和毛细管截面有关，根据不同情况选用不同型号的电源. 对于实验室所用 220～300mm 激光管，所需管压降为 2000V 左右. 管子着火电压远高于工作电压，为 3000～4000V. 最佳工作电流为 4～5mA，此时激光输出最大.

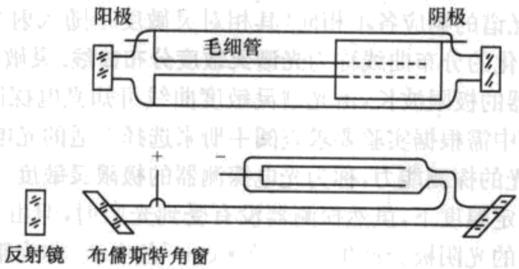


图 4.0.4　He-Ne 激光管的结构

使用激光器时，正、负极不得接错，切断电源后，由于高压电路中有电容，若未使输出端短路放电，还会触电麻手. **氦氖激光束具有很高的亮度，不能直视它，特别不能直视经过聚焦的激光束！**

4. 固体发光光源

这类光源中的发光二极管是一种半导体灯，它是由 P 型半导体和 N 型半导体组成的 PN 结二极管，其外形如图 4.0.5(a)所示. 当在 PN 结上施加正向电压时，被注入的少数载流子穿过 PN 结，在 PN 结区形成大量电子、空穴的复合，复合时以热或光的形式辐射出光子，如图 4.0.5(b)所示光子的能量满足 $E_g = h\nu$，E_g 为半导体材料的禁带宽度，不同材料的 E_g 不同，因而 ν 不同. 一般在可见光区域采用 GaP（发光波长为 550.0nm）、$GaAs_{1-x}P_x$（波长 550～867nm）、SiC（波长 435nm）等半导体材料；而 Ge、Si、GaAs 等辐射是在红外区域. 半导体灯常用作信号灯、显示灯(数码管)等.

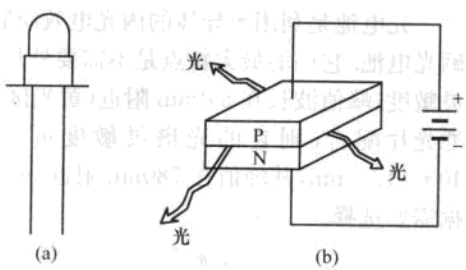


图 4.0.5

4.0.2　常用光电探测器

光探测器可分为主观的和客观的两类. 主观的光探测器就是人的眼睛，人眼依靠辅助工具(如显微镜和望远镜等)可以观察一些基本的光学现象，也可以在仪器(光度计)的帮助下去比较颜色相近的光强的强弱. 人眼的最大特点是在可见光谱区域内对微弱光的接收灵敏度极高，这是除光电倍增管外其他光探测器所不能比拟的. 但是，人眼可观察的光谱区较窄，要测量光的强度比较困难，且人眼极易疲倦，特别对于激光不能直接用人眼观察，所以目前更多地采用客观的光探测器，如光电探测器等.

光电探测器是利用一些物质受到光照射后，其电学性质发生变化的特点制成的光电器件. 光电探测器可分为三类：①光电发射——外光电效应，如真空光电管、光电倍增管等；②光电导——内光电效应，如半导体光导管、光电二极管等；③光生伏打效应——内光电效应，如光电池.

各种光电探测器对光谱的响应各不相同，其相对灵敏度是随入射光波的波长而改变的. 相对灵敏度随波长变化的分布曲线称为**光谱灵敏度分布曲线**. 灵敏度降到最大值1/10处的波长称为光电探测器的极限波长，由光谱灵敏度曲线可知光电探测器的工作波长范围和探测极限，因而应用中需根据实验要求查阅手册来选择合适的光电探测器.

光电探测器对微弱光的探测能力，称为光电探测器的**极限灵敏度**. 极限灵敏度还与入射光的波长有关. 在有一定温度下，虽然探测器没有受到光照射，但由于热激发也会产生光电子，如在室温下典型的光阴极会产生 $10^{-17}A \cdot cm^{-2}$的电流，称为**暗电流**或**本底电流**. 如果把杂散光产生的电流也包括在暗电流中，就比实际暗电流大得多，因此一般要求把杂散光减小到最低限度. 在某些情况下，暗电流会使探测器灵敏度下降. 光电池、光电管等由于连续使用，或强光照射时间过长，会出现灵敏度下降（这种现象称为光电探测器的“疲劳”）. 这时应停止使用，并存放在暗处，方可得到部分或全部恢复.

光电探测器受光照射以后产生的光电流与入射光强成正比，这一关系称为光电探测器的**线性响应**. 实际使用时，希望光电探测器有较宽的线性范围，即当入射光通量在较宽的线性范围内变化时，探测器仍保持良好的线性响应.

1. 光电池

光电池是利用半导体的内光电效应制成的一种光电转换器件. 常用的有硅光电池和硒光电池. 它们的最大特点是不需要外加工作电源. 硒光电池在可见光谱范围内有较高的灵敏度，峰值波长在 540nm 附近（黄光区），它适用于测量可见光. 如果硒光电池与适当的滤光片配合，则它的光谱灵敏度可与人眼接近. 硅光电池的光谱灵敏度范围为 400～1200nm，其峰值在 780nm 附近（近红外区），但其性能比硒光电池稳定. 使用时应根据需要选择.

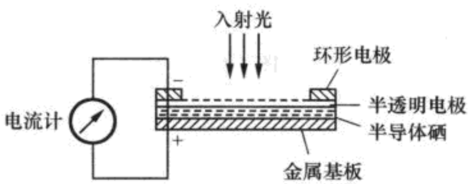


图 4.0.6　硒光电池结构示意图

硒光电池的结构如图 4.0.6 所示. 硒受光照时，硒中形成电子—空穴对，电子被结电压吸入半透明金属膜，因而结电压降低，金属膜变成负电位，金属基板对透明金属膜层为正电位，这个电位差值与入射光通量有关，如果用导线接入电流计，就会产生光电流.

光电流的大小与入射光通量（或照度）有关（称为光电特性），也与入射光的光谱组成有关（称为光谱响应特性）. 因此使用光电池时，应利用它光电特性中的线性区域，这就要求入射光通量较小，且外接负载电阻（如电流计内阻）阻值小. 这样在检测中，光电池的性能才能稳定，有好的线性关系.

2. 光电二极管（光敏二极管）

光电二极管也是利用半导体的内光电效应制成的光电转换器件. 根据材料和制造工艺的不同有多种型号，其中常用的有 2CU 型和 2DU 型. 它们的光谱响应范围为 400.0～1100.0nm，灵敏度峰值波长为 800.0～900.0nm. 下面以 2DU1 为例说明光电二极管的结构和使用.

2DU1 型光电二极管的外形如图 4.0.7 所示. 它有前极、后极和环极三根引出线. 前极是光敏区(N 型区)的引线,后极为衬底(P 型区)的引线. 环极的作用是减少光电管的暗电流和防止外界的干扰. 光通过管壳上的光窗照射到光敏区. 管子一般处在反向电压下工作,其电路图如图 4.0.8 所示.

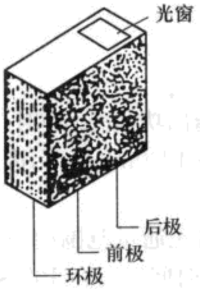


图 4.0.7

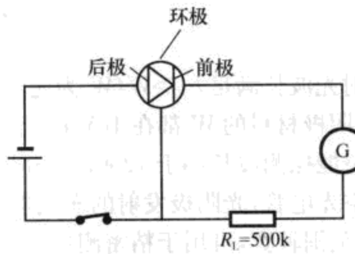


图 4.0.8

光电二极管的反向电阻很大,可达几兆欧,因此电流很小. 当外加电压增加时,电流也增加,逐渐趋向饱和. 无光照时,反向饱和电流即为暗电流,接上环极后,暗电流可减小到 1μA 以下. 当光照射后,自由电子数目增多,线路中电流增大,形成光电流.

光电二极管的性能一般用它的伏安特性和光电特性来描述,如图 4.0.9 所示. 由伏安特性可知,入射光能一定时,光电流随外电压的增加而增加,并逐渐趋向饱和,特性曲线的形状与半导体三极管类似. 从光电特性还可看出,光电流和入射光能量成正比. 光电特性是线性这一特点可以用于光强测量,只要读出光电流的相对强度,就可表示出光的相对强度.

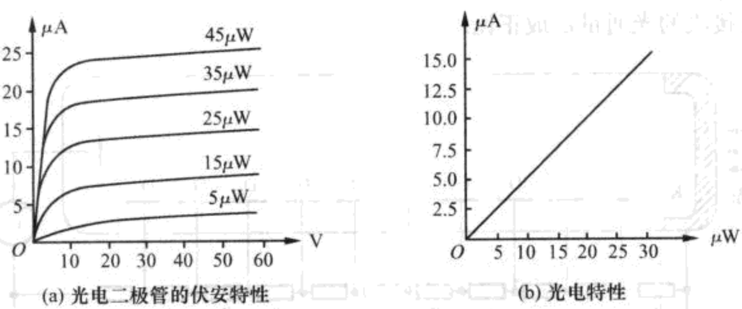


图 4.0.9

3. 光电管

光电管由一个阴极和一个装在抽成真空或充有惰性气体的玻璃管内的阳极制成. 阴极表面涂有适当的光电发射材料,称为光阴极. 当有一定波长的光照射阴极时,光阴极发射出电子,如果在两极间加上电压,则有光电流产生. 图 4.0.10(a)为不透明光阴极光电管的典型电路,图 4.0.10(b)为半透明光阴极光电管的典型电路.

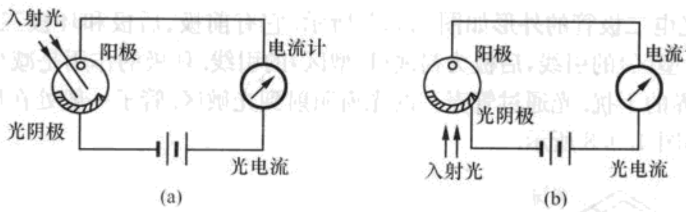


图 4.0.10

只要入射光波长满足 $h\nu > W$(W 为光阴极表面的电子逸出功,$\nu = c/\lambda$)时,就有光电子逸出.现有光阴极材料的 W 都在 1eV 以上,相应的长波限在 1200nm 以下,因此现在使用的光电管都只能探测波长小于 1200nm 的光.

对于真空光电管,光阴极发射的光电子数在很宽的入射光通量范围内与光通量成正比,说明线性范围较宽,可用于精密测量.真空光电管的响应时间一般在 10^{-8}s 以下,可用于测量脉冲光.真空光电管的灵敏度比较低,因此有些光电管中充以惰性气体,以增加光电流,提高灵敏度,但这样会使线性响应范围减少,光阴极灵敏度降低.

4. 光电倍增管

光电倍增管是把微弱的入射光转换成光电子,并使光电子获得倍增的光电探测器,其结构如图 4.0.11 所示.图中 K 是光阴极,$D_1 \sim D_{10}$ 是二次发射极(打拿极),A 为阳极.当阴极被光照射时,逸出阴极的光电子被电场加速后打到 D_1 上,在高速电子激发下,D_1 产生二次电子发射.这些电子又被电场加速并入射到 D_2 上,激发出更多的二次电子……此过程一直继续到 D_{10}.最后,经倍增的光电子(可为原来的数百万倍)被阳极收集而输出光电流.光电倍增管的阳极电流由串接在阳极上的电流计 G 读出,在线性区域内,阳极电流 I_a 与光阴极接收的光通量 φ 成正比.

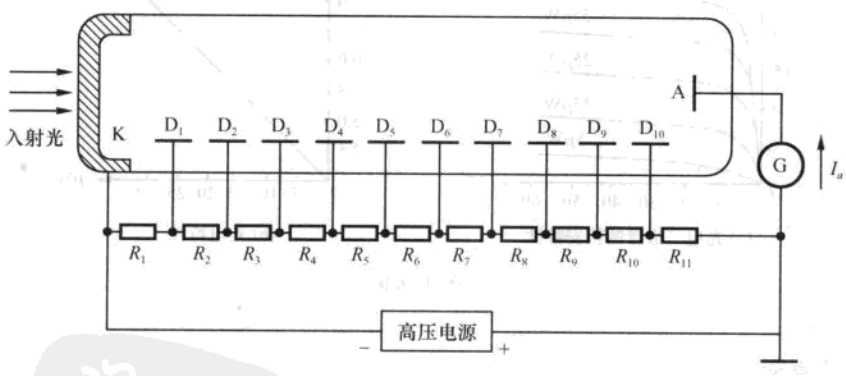


图 4.0.11 光电倍增管结构示意图

光电倍增管的各极电压由电阻链分压获得.其工作电压的选取应保证光电倍增管工作在伏安特性曲线的线性区域内,一般总电压 U_{AK} 在 900～2000V,极间电压 U_D 在 80～150V.高压电源的输出要足够稳定,才能保证各级间电压稳定,从而使测量准确.

由于光电倍增管的灵敏度高，微弱的光照能产生大的电流，因此加上高压后，即使避免强光照射和杂散光影响，在完全黑暗处也有暗电流，使用时应加以注意.

5. 光导管(光敏电阻)

某些半导体，如硫化镉、硒化镉，当光照射后，其电导率增加，因而电阻变小，而且电阻的变化与入射光的通量成反比. 因此，可利用光导管受光照后电阻的变化来测量入射光通量的大小，其电路如图 4.0.12 所示.

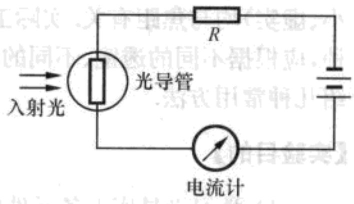


图 4.0.12 光导管测量电路

光电流与入射光通量有关，同时与工作电压成正比(在一定的电压范围内). 每种光导管都规定了允许最高的电压，一般在几十伏到几百伏之间.

一般光导管的响应时间在 $10^{-1}\sim10^{-8}$s，其灵敏度与响应时间成正比，而光谱灵敏度的分布与材料有关. 硫化镉光导管的光谱灵敏度峰值波长在 510.0nm 左右，硒化镉的峰值波长在 710.0nm 左右，硫—硒化镉光导管的峰值波长在两者之间. 光导管的光谱灵敏度分布还与光导管的工作温度有关，工作温度低，分布曲线向长波移动. 测量近红外光时，常用硫化铝、锑化铟等光导管以及锗、硅光敏二极管.

4.0.3 光学仪器的使用和维护规则

光学仪器大多是精密仪器，核心部件是光学元件和经过精密加工的机械部分. 光学元件大部分由(光学)玻璃制成，光学表面经过精细抛光，有些表面还镀有膜层，以达到一定的性能要求，因此极易损坏. 光学仪器的机械部分一方面用来固定光学元件，另一方面可使光学系统按设计要求在一维、二维和三维空间作移动或转动. 这些机械部分加工精密，以保证仪器的高精度，因此也易于损坏，实验时必须严格遵守操作规程：

(1) 必须在了解仪器性能和使用方法以后才能操作仪器.

(2) 任何时候都不能用手触及元件的光学表面(光线在此表面反射或折射). 如果需要用手拿某些光学元件时，只能拿非光学表面即磨砂面，如透镜的侧面边缘，棱镜的上下底面等. 光学表面若有污痕或指印，必须在教师指导下，先用镜头毛刷轻轻拂扫或用洗耳球吹除灰尘，确认表面没有硬质颗粒后，再用洁净镜头纸或麂皮轻轻擦净. 绝不准用手帕、衣服或其他纸片擦拭. 若光学表面有严重的污物擦不净时，应由实验技术人员用乙醚、酒精等清洗. 有些光学元件的镀膜面不能擦拭和清洗(如光栅等)，使用时要倍加注意爱护.

(3) 任何光学元件都必须轻拿、轻放，勿使元件碰撞；放置时不要放在记录本或书本上，以免把它扫落地面而损坏.

(4) 机械部分的操作，要按仪器的有关操作规定和要求进行. 操作时用力要轻，动作要慢，要全神贯注，不得随意旋转和拨动，以免造成仪器严重磨损而降低仪器精度或损坏.

(5) 光学仪器装配精密，拆卸后很难保证仪器原有精度，因此严禁学生拆卸仪器.

(6) 实验完成后，应将仪器整理好，光学元件(如透镜、棱镜和光栅等)应归还原处.

实验4.1 薄透镜焦距的测定

透镜是最基本的光学元件,焦距是透镜的重要参量之一,透镜的成像位置及性质(大小、虚实)均与焦距有关.实际工作中,常常需要测定不同透镜的焦距.测焦距的方法有多种,应根据不同的透镜、不同的精度要求和具体的实验条件选择合适的方法.本实验仅介绍几种常用方法.

【实验目的】

(1) 学习光具座上各元件的共轴调节方法.

(2) 掌握测定薄透镜焦距的几种基本方法.

【实验器材】

光具座(或光学平台)、凸透镜、凹透镜、平面反射镜、望远镜、物(刻有十字线的毛玻璃)、像屏、光源.

【实验原理】

透镜分为两类:一类是凸透镜(或称正透镜或会聚透镜),对光线起会聚作用,焦距越短,会聚本领越强;另一类是凹透镜(或称负透镜或发散透镜),对光线起发散作用,焦距越短,发散本领越强.

在近轴光线的条件下,透镜置于空气中,透镜成像的高斯公式为

$$\frac{1}{s'}-\frac{1}{s}=\frac{1}{f'} \tag{4.1.1}$$

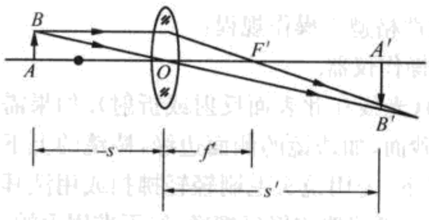


图 4.1.1

式中,s'为像距,s为物距,f'为第二焦距.对于薄透镜,由于透镜的厚度比球面半径小得多,因此透镜的两个主平面与透镜的中心面可看做是重合的.s、s'、f'皆可视为物、像、焦点与透镜中心(即光心)的距离,如图4.1.1所示.

对于(4.1.1)式中的各物理量的符号,我们规定:光线自左向右传播,以薄透镜中心为原点量起,若其方向与光的传播方向一致者为正,反之为负.运算时,已知量需添加符号,未知量则根据求得结果中的符号判断其物理意义.

测定薄透镜焦距的方法有多种,它们均可以由(4.1.1)式导出,至于选用什么方法和仪器,应根据测量所要求的精度来确定.

1. 测凸透镜的焦距

1) 用物距—像距法测焦距

当实物经凸透镜成实像于白屏上时,通过测定 s、s',利用(4.1.1)式即可求出透镜的焦距 f'.

若 $-s\to\infty$，则 $s'\to f'$. 也就是说，可把远处的物体作为物，经透镜成像后，透镜光心到像平面的距离就等于焦距. 此法多用于粗略估测，误差较大.

2) 用贝塞尔法（又称透镜二次成像法）测焦距

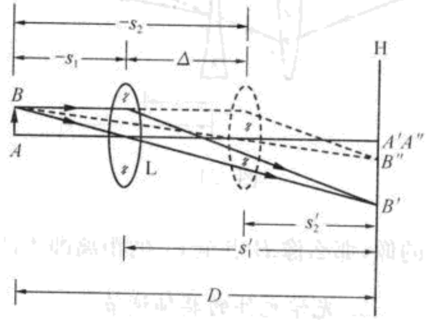


图 4.1.2

如图 4.1.2 所示，AB 为物，L 为待测透镜，H 为白屏，若物与屏之间的距离 $D>4f'$，且当 D 保持不变时，移动透镜，则必然在屏上两次成像，当物距为 s_1 时，得放大像，当物距为 s_2 时，得缩小像. 透镜在两次成像之间的位移为 Δ，根据光线可逆性原理可得

$$-s_1=s_2'$$
$$-s_2=s_1'$$

则

$$D-\Delta=-s_1+s_2'=-2s_1=2s_2'$$
$$-s_1=s_2'=\frac{D-\Delta}{2}$$

而

$$s_1'=D-(-s_1)=D-\frac{D-\Delta}{2}=\frac{D+\Delta}{2}$$

将此结果代入(4.1.1)式后，整理得

$$f'=\frac{D^2-\Delta^2}{4D} \tag{4.1.2}$$

上式表明，只要测出 Δ 和 D 值，就可算出 f'. 由这种方法得到的焦距值较为准确，因为用这种方法可以不考虑透镜本身的厚度.

3) 用自准直法测焦距

如图 4.1.3 所示，L 为待测凸透镜，平面反射镜 M 置于透镜后方的一适当距离处. 若物体 AB 正好位于透镜的前焦面处，那么物体上各点发出的光束经透镜折射后成为不同方向的平行光，然后被反射镜反射回来，再经透镜折射后，成与原物大小相同、倒立的实像 $A'B'$，且与原物在同一平面，即成像于该透镜的前焦面上，此时物与透镜光心的距离就是透镜的焦距，其数值可直接由光具座导轨标尺读出. 这种方法利用调节实验装置本身使之产生平行光以达到调焦的目的，故称为自准直法. 这种方法不仅可用于测透镜焦距，还常常用于光学仪器的调节，如平行光管的调节和分光计中望远镜的调节等.

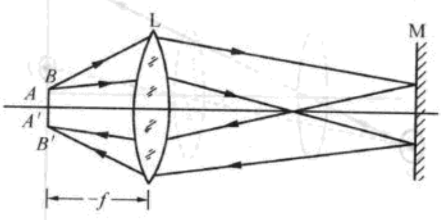


图 4.1.3

2. 测凹透镜的焦距

1) 用物距—像距法测凹透镜焦距

如图 4.1.4 所示，凸透镜 L_1 将实物 A 成像于 B，把被测凹透镜 L_2 插入 L_1 与像 B 之

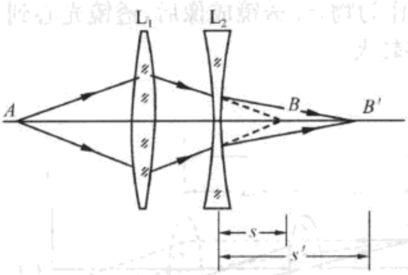


图 4.1.4

间，然后调整 L_2 与 B 的距离，使光线的会聚点向右移至 B'，即虚物 B(对 L_2 而言)经 L_2 成一实像于 B'，测定物距 s、像距 s'，代入公式(4.1.1)即可求出凹透镜的焦距 f'.

2) 用望远镜法测定凹透镜焦距

如果图 4.1.4 中的 B 点刚好处于凹透镜 L_2 的主焦点上，则 B' 点将移到无穷远处，即光线经 L_2 折射后，将变成平行光射出. 此时，用望远镜(望远镜已预先聚焦无穷远)观察，可清楚地看到 B 点的像，那么像 B 点至 L_2 的距离即为凹透镜焦距 f'.

3. 光学元件的共轴调节

为了读数准确避免不必要的像差，需要对光学系统进行共轴调节，使各透镜的光轴重合且与光具座的导轨严格平行，物面中心处在光轴上，且物面、屏面垂直于光轴. 此外，照明光束也应大体沿光轴方向. 共轴调节的具体方法是：

1) 粗调

把光源、物、透镜、白屏等元件放置于光具座上，并使它们尽量靠拢，用眼睛观察、调节各元件的上下、左右位置，使各元件的中心大致在与导轨平行的同一条直线上，并使物平面、透镜面和屏平面三者相互平行且垂直于光具座的导轨.

2) 细调

点亮光源，利用透镜二次成像法(图 4.1.2)来判断是否共轴，并进一步调至共轴.

若物的中心偏离透镜的光轴，则移动透镜两次成像所得的大像和小像的中心将不重合，如图 4.1.5 所示. 就垂直方向而言，如果大像的中心 P' 高于小像的中心 P''，说明此时透镜位置偏高(或物偏低)，这时应将透镜降低(或将物升高). 反之，如果 P' 低于 P''，便应将透镜升高(或将物降低).

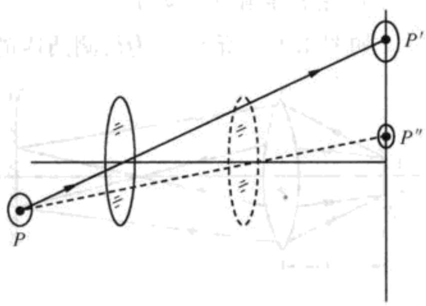


图 4.1.5

调节时，以小像中心为目标，调节透镜(或物)的上下位置，逐渐使大像中心 P' 靠近小像中心 P''，直至 P' 与 P'' 完全重合. 同理，调节透镜的左右(即横向)位置，使 P' 与 P'' 两者中心重合，见图 4.1.5.

如果系统中有两个以上的透镜，则应先调节只含一个透镜在内的系统共轴，然后再加入另一个透镜，调节该透镜与原系统共轴(此时，是否还需要调节大、小像的中心重合?).

【实验内容】

(1) 将光源、物、待测透镜、屏等放置于光具座(或光学平台)上，调节各元件使之共

轴. 为了使物照明均匀,光源前应加毛玻璃.

(2) 用物距—像距法测凸透镜的焦距. 改变屏的位置,重复测量5次,求其平均值,将数据记入表4.1.1.

(3) 用贝塞尔法测凸透镜的焦距. 固定物与屏之间的距离(略大于$4f$),往复移动透镜并仔细观察,至像清晰时读数,重复测量5次,求其平均值,将数据记入表4.1.2.

(4) 用自准直法测凸透镜的焦距. 取下光屏,换上平面反射镜,并使平面镜与系统共轴,移动透镜,改变物与透镜之间的距离,直至物屏上出现清晰的且与物等大的像为止,记下此时物距,即为透镜的焦距. 重复测量5次,求其平均值.

(5) 用物距—像距法求凹透镜的焦距:

① 按图4.1.4所示调节光路,使物经凸透镜L_1成一清晰像于B处的屏上,记录此时屏的位置x_1.

② 保持物与L_1之间的距离不变,在L_1与屏之间插入凹透镜L_2,调节L_2与系统共轴. 然后移动L_2至靠近屏的位置,再右移屏至B'处找到清晰像. 记录此时L_2的位置x_0及屏的位置x_2,由x_1、x_2、x_0的值计算s、s',代入(4.1.1)式求出凹透镜的焦距f'. 保持L_1不动,移动L_2至不同的位置,重复测量5次,求其平均值,将数据记入表4.1.3.

③ 取下光屏,换上望远镜,用望远镜法测凹透镜的焦距,重复测量5次,求其平均值.

【数据处理】

表4.1.1 物距—像距法测凸透镜焦距数据表

测量序号 N	1	2	3	4	5	平均
物屏位置 x_A/cm						
透镜位置 x_0/cm						
像屏位置 $x_{A'}$/cm						
s/cm						
s'/cm						

表4.1.2 贝塞尔法测凸透镜焦距数据表

物屏位置 x_A=________ cm　像屏位置 $x_{A'}$=________ cm　D=________ cm

测量序号 N	1	2	3	4	5	平均
透境成大像位置 x_1/cm						
透境成小像位置 x_2/cm						
$\Delta=\lvert x_2-x_1\rvert$/cm						

表4.1.3 物距—像距法测凹透镜焦距数据表

x_1=________ cm

测量序号 N	1	2	3	4	5	平均
x_0/cm						
x_2/cm						
$s=\lvert x_1-x_0\rvert$/cm						
$s'=\lvert x_2-x_0\rvert$/cm						

【预习思考】

(1) 已知一凸透镜的焦距为 f,要用此透镜成一物体放大的像,物体应放在离透镜中心多远的地方? 成缩小的像时,物体又应放在多远的地方?

(2) 为什么实验中要用白屏作像屏? 可否用黑屏、透明平玻璃、毛玻璃屏? 为什么?

(3) 为什么在光源前加毛玻璃? 为什么用单色光更好些?

(4) 用贝塞尔法测凸透镜焦距时,为什么 D 应略大于 $4f$?

【习题】

(1) 为什么要调节光学系统共轴? 调节共轴有哪些要求? 怎样调节?

(2) 用自准法能测量凹透镜的焦距吗? 若能,请画出光路原理图.

(3) 如果凸透镜的焦距大于光具座的长度,试设计一个实验,在光具座上能测定它的焦距.

实验 4.2 透镜组基点的测定

大多数实际的光学系统至少都有两个折射面(如透镜)或多于两个的折射面(如透镜组). 如果所有折射面的球面中心都在一直线上,则这组球面称为共轴球面系统,而该直线称为系统的主光轴.

通常把共轴球面系统作为一个整体来研究. 这时,可用几个特别的点和面来表征系统在成像上的性质. 若已知这些点和面的位置,便可用公式法(高斯公式或牛顿公式)或作图法来求解系统成像情况. 这几个特别的点和面分别是系统的主焦点(F、F')和主焦面,主点(H、H')和主平面,节点(N、N')和节平面,统称为系统的基点和基平面. 实际使用的共轴球面系统——透镜组,在多数情况下被置于空气中,物方和像方媒质的折射率相同,因此节点和主点重合,节平面和主平面重合. 在这种情况下,整个透镜组只用四个基点就可以完全确定.

本实验介绍两种测定透镜组基点的方法.

【实验目的】

(1) 了解焦距仪中各部分的结构特点.

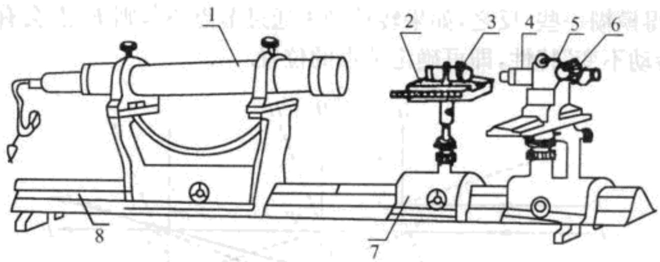
(2) 用测节器法和焦距仪法测定透镜组的基点和焦距.

【实验器材】

550 型焦距仪、待测透镜组.

【仪器介绍】

550 型焦距仪如图 4.2.1 所示,它包括下列各部分:



1.平行光管; 2.测节器; 3.待测透镜组; 4.读数显微镜; 5.显微镜调焦手轮(右侧);
6.测微目镜固定螺钉; 7.光具架; 8.光具座

图 4.2.1

(1) 平行光管. 物镜焦距 $f_0'=550\text{mm}$(参考值,使用时按实测值),玻罗板位于物镜的焦平面上,玻罗板上五对刻线的间距分别为 1.000mm、2.000mm、4.000mm、10.000mm、20.000mm(参考值,实验时可视为常数).

(2) 测节器. 它是一可转动的滑槽,滑槽旁边固定一标尺,转轴垂直于滑槽. 槽上有一可沿槽移动的滑块夹具,可把待测透镜组固定在夹具上. 测薄透镜焦距时,也可用透镜夹固定.

(3) 读数显微镜. 它由物镜和测微目镜组成,固定在能够调节镜筒方位及上下的光具架上,显微镜调焦时,可移动光具架底座和旋转手轮 5. 物镜的放大倍率通常有 1×、0.5×等.

(4) 光具座.

4.2.1 用测节器法测定透镜组的基点

【实验原理】

如图 4.2.2 所示,图中虚线表示待测透镜组的两表面,F、F'和 H、H'分别是它的两个焦点和两个主点. 若能测得 f、f'、l、l',以及透镜组的厚度 d,则透镜组的基点位置即被确定.

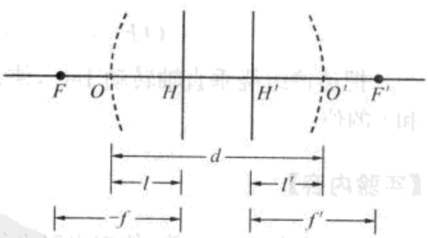


图 4.2.2

利用节点的特性可以从实验确定透镜组节点的位置. 如图 4.2.3 所示. 设有一束平行光入射到透镜组,光线经透镜组后会聚于第二焦点 F'. 若保持入射平行光束的方向不变,使透镜组绕过节点 N'并垂直于光轴的转轴转动一小角度,则光束的会聚点的横向位置将不发生改变,只是变得稍微模糊些. 转动前(图中的实线所示)为 F'点,转动后(图中的虚线所示)为 F''点. 这是因为转动透镜组后,通过 N 点的入射光线方向仍与转动前的入射光线方向一致,即 $SN/\!/PN$,所以出射线 $N'P'$的方向也不改变. 又因透镜组绕 N'点转动,N'点固定,所以 $N'P'$光线也无移动,而平行光束经透镜组后的会聚点必落在 $N'P'$线上,故会聚点 F''不会发生横向移动. 至于 F''点沿轴向的位置,当然会随着透镜组的转动有很小的改变,

屏上的像就变得模糊一些. 反之,如果转动轴未通过节点 N',则 F''点会有横向移动. 利用节点的这一"转动不变"特性,即可确定节点的位置.

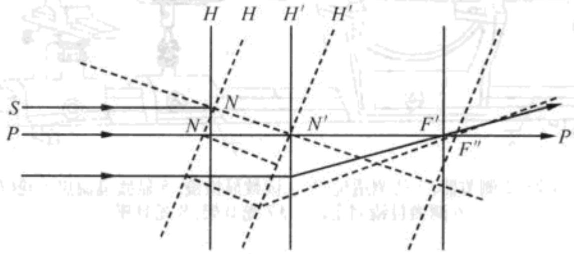


图 4.2.3

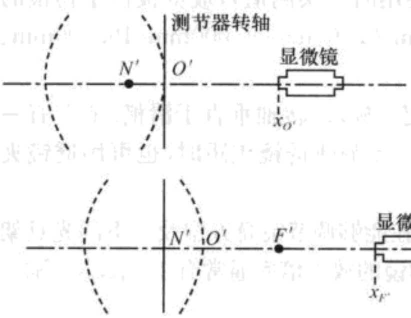


图 4.2.4

本实验在焦距仪上进行. 待测透镜组被固定在测节器上. 测量方法是:如图 4.2.4 所示,选待测透镜组靠近显微镜一端表面的顶点 O' 为参考点,先把 O'调至转轴上,利用显微镜定出相对 O'点(即转轴)的位置 $x_{O'}$,再把节点移至转轴上,定下此时显微镜相对 F'点的位置 $x_{F'}$. 同时分别记下 O'点和 N'点处于转轴上时透镜组在测节器上的位置 $y_{O'}$、$y_{N'}$. 见图 4.2.4.

因为 $O'x_{O'}=F'x_{F'}$(显微镜的工作距离一定)

所以

$$f' = N'F' = | x_{F'} - x_{O'} | \tag{4.2.1}$$

$$l' = O'N' = | y_{N'} - y_{O'} | \quad (N' \text{ 点即确定}) \tag{4.2.2}$$

$$O'F' = f' - l' \quad (F' \text{ 点即确定}) \tag{4.2.3}$$

把透镜组绕垂直轴转动 180°,使光线由透镜组另一表面入射,利用同样的方法测定 f 和 l 的值.

【实验内容】

(1) 调节平行光管,使它出射平行光.

(2) 按图 4.2.1 所示摆放好实验装置,将待测透镜组固定在测节器上. 调节各元件共轴,使通过显微镜观察到清晰的玻罗板的像.

(3) 测定 f'、l'.

① 将参考点 O'调节到转轴上(为了便于观察镜面顶点 O',可用镜头刷蘸少许碳酸钙粉于镜面中心处,切不可用笔或其他物件在镜面做标记). 调节方法是:首先目测并调节测节器上的滑块,使透镜组 O'表面大致位于测节器的转轴上. 当测节器做微小转动时,观察 O'在显微镜视场中的像是否在横向移动. 如果移动,可逐步微微推动滑块,同时由显微镜

观察到 O' 的像的移动随着滑块的移动逐渐减小(若增大,则应反方向移动滑块),直至转动测节器时,O' 的像不动为止.此时 O' 点已准确位于测节器的转轴上.然后转动测节器使透镜组的光轴与平行光管光轴平行,再调节显微镜,使 O' 成像清晰且与目镜叉丝间无视差(视差及其判断方法见附录),记下此时显微镜在光具座上的位置 $x_{O'}$,并记下透镜组在测节器上的位置 $y_{O'}$(由测节器上的标尺读出),此后转轴的位置不得再变动(即将测节器的底座固定于光具座上).

② 将透镜组的第二节点 N' 调节到测节器的转轴上.逐步移动测节器上的滑块,改变透镜组在测节器上的位置,同时调节显微镜(不得调动显微镜的调焦手轮5,为什么?),观察平行光束经透镜组后的会聚点即玻罗板的像,至转动测节器时像无横向移动,只是变得模糊一些,此时 N' 已准确位于转轴上.然后再使透镜组光轴与平行光管光轴平行,玻罗板成像清晰且与目镜叉丝之间无视差,记录此时显微镜在光具座上的位置 $x_{F'}$,并记下透镜组在测节器上的位置 $y_{N'}$.进行这一步时,还应注意 F' 在 O' 的哪一侧,N' 在 O' 的哪一侧,并用草图标明.

将所测数据代入(4.2.1)式和(4.2.2)式计算 f' 和 l' 的值.

(4) 测 f、l.

把测节器连同透镜转动180°,使入射方向和出射方向互换,仿照3的步骤测得 f、l 的值.

(5) 自行设计实验步骤测定透镜组的厚度 d.

(6) 绘图表示透镜组及其主点(亦即节点)和焦点的位置.

4.2.2 用焦距仪法测定透镜组的基点

【实验原理】

1. 测定透镜组的焦距 f'

如图4.2.5所示,L_0 为平行光管物镜,L为待测透镜组(设为会聚系统).玻罗板 AB 位于 L_0 的第一焦平面上,经 L_0 及待测透镜组L成像于L的第二焦平面上,设像 $A'B'$ 的大小为 y',由图可知

$$\triangle ACB \backsim \triangle MFH, \quad A'B' = MH$$

$$f' = f_0 \cdot \frac{A'B'}{AB} = f_0 \frac{y'}{y} \tag{4.2.4}$$

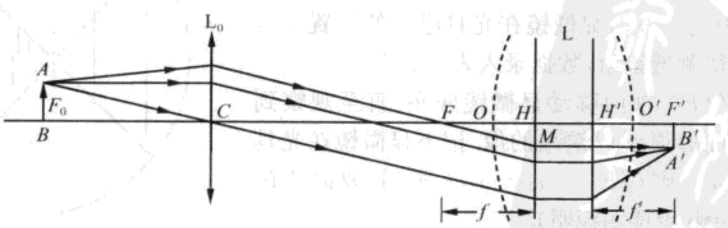


图4.2.5

式中，f_0 为平行光管物镜焦距，f'为待测透镜组的焦距，y 为玻罗板上某一线对的间距，那么只要测出相应线对的像间距 y'，利用(4.2.4)式即可计算待测透镜组的焦距 f'.

若用读数显微镜测量 y'的大小，则有

$$f' = f_0 \frac{y''}{\beta y} \tag{4.2.5}$$

式中，y''为 y'经显微镜物镜所成像的大小，β 为显微镜物镜的放大倍数.

2. 测定 $O'F'$的大小，从而定出 F'、$H'(N')$的位置

如图 4.2.6 所示，O、O'表示待测透镜组 L 两表面的顶点，当通过显微镜看清透镜组后焦面上玻罗板的像时，记下显微镜的位置 $x_{F'}$，然后轴向移动显微镜使之调焦在待测透镜组的后表面的顶点 O'，再记下此时显微镜的位置 $x_{O'}$，则

$$O'F' = |x_{F'} - x_{O'}| \tag{4.2.6}$$

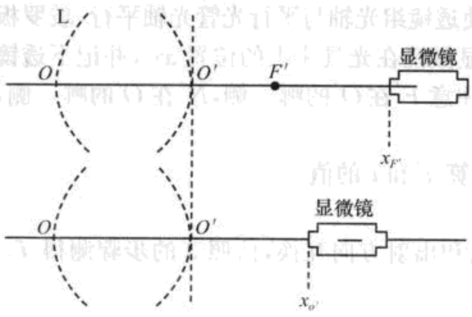


图 4.2.6

由此可确定 F'的位置(相对 O'点)，再由 $H'F'=f'$确定待测透镜组(本实验采用惠更斯目镜或冉斯登目镜)的主点 H'的位置.

把透镜组转 180°，使入射方向和出射方向互换，定出 F、H 的位置. 若已知透镜组的厚度为 d，则该透镜组的基点位置即可确定.

【实验内容】

使用焦距仪进行测量时，焦距仪必须保持下述工作状态：①平行光管发出平行光；②读数显微镜严格保持规定的光学管长度.

(1) 实验装置如图 4.2.1 所示. 将待测透镜组固定在测节器上(此时，测节器只作为夹具用)，调节各元件共轴并使玻罗板刻线成竖直位置(如果不是，可旋转平行光管).

(2) 测定 f'. 通过显微镜观察待测透镜组第二焦平面上玻罗板的像，并沿轴向移动显微镜，使像清晰且与目镜的叉丝间无视差，转动测微目镜使分划板的双线 a 与玻罗板线对 b 平行，见图 4.2.7. 选择适当间隔的某一线对，用测微目镜测量其 y''的值(测微目镜的正确使用方法见实验 4.6 附录). 测量 5 次，取平均值，利用公式(4.2.5)计算 f'值，同时记下此时显微镜在光具座上的位置 $x_{F'}$，并随即固定待测透镜组，数据录入表 4.2.1.

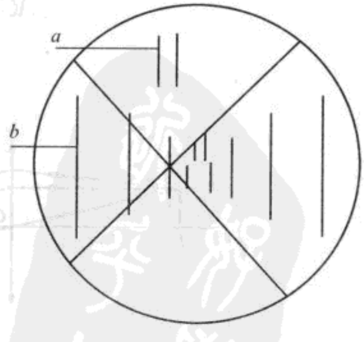


图 4.2.7

(3) 测 $O'F'$. 轴向移动显微镜底座，直至观察到透镜组后表面的顶点 O'清晰的像. 记下显微镜在光具座上的位置 $x_{O'}$，则 $O'F'=|x_{F'}-x_{O'}|$，此时，要记录 F'在 O'的哪一侧(用草图标明).

(4) 将待测透镜组转过 180°，测 f 和 OF.

(5) 测量透镜组的厚度 d(自行设计方法).

(6) 根据上面的数据绘图表示透镜组及各基点的位置(比例尺 1∶1).

【数据处理】

表 4.2.1

f_0=________ mm，β=________

靠近显微镜的表面	测量次数	$y''=\|x_1-x_2\|$/mm			$O'F'$(或 OF)/mm		
		x_1	x_2	y''	$x_{F'}$	$x_{O'}$	$O'F'$
O'面	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
		x_1	x_2	y''	x_F	x_O	OF
O面	1						
	2						
	3						
	4						
	5						

O'面：$\overline{y''}$=________mm，$\overline{f'}$=________mm，$\overline{O'F'}$=________mm.

O面：$\overline{y''}$=________mm，$\overline{f}$=________mm，OF=________mm.

(1) 将 O 面和 O' 面测得的 $\overline{f}$、$\overline{f'}$ 取平均值，得

$$\overline{f_x}=\frac{\overline{f}+\overline{f'}}{2}\,(\mathrm{mm})$$

(2) 先估算 y'' 的不确定度 $U(y'')$，最后估算 f_x 的不确定度 $U(f_x)$. 各已知量的误差分别为

$$\frac{U(f_0)}{f_0}=0.3\%,\quad \frac{U(y)}{y}=0.02\%$$

(3) 完整表达实验结果

$$f_x=\overline{f_x}\pm U(f_x)\,(\mathrm{mm})$$

$$U_r=\frac{U(f_x)}{\overline{f_x}}\times 100\%$$

【预习思考】

(1) 在测节器法中，将参考点 O' 调在转轴上的目的是什么？在测 $x_{O'}$ 和 $x_{F'}$ 的过程中，测节器在光具座上的位置能否前后移动？显微镜的调焦手轮能否转动？

(2) 如何正确使用测微目镜？

(3) 若用焦距仪法来测薄透镜焦距，与实验 4.1 中各方法相比较，有何优越性？能否用实验 4.1 的方法来测透镜组的焦距？

【习题】

(1) 设想一下用什么方法可以判断焦距仪法中所测透镜(或透镜组)是会聚还是发散的?

(2) 若读数显微镜的测微目镜被你沿物镜筒向后移动了几毫米,试问:物镜标称值$\beta=1$是否还能在公式(4.2.5)中应用?β值是增大、减小还是不变?可用什么办法校正到$\beta=1$?

【附录】

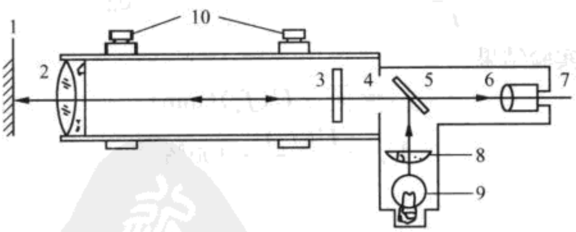
1. 视差

所谓视差是指当两个物体静止不动时,改变观察者的位置,一个物体相对另一物体有明显移动的现象.在光学仪器的调节中,当人的眼睛从一侧移到另一侧时,像相对于十字叉丝有明显的移动,即出现视差,则说明像与叉丝不在同一平面.如果当眼睛移到右边时,像就移到十字叉丝的左边,说明这时像是在十字叉丝与眼睛之间;如果当眼睛移到右边时,像就移到叉丝的右边,说明这时像是在十字叉丝之前.反之,当眼睛左右移动时,像与十字叉丝之间无相对移动,它们就在同一平面,则说明聚焦已调好.因此,光学实验中常根据有无视差来判断像与物是否共面.

2. 平行光管

平行光管主要是用来产生平行光束的,它是装校和调整光学仪器的重要工具之一,也是重要的光学量度仪器.若配用不同的分划板,连同测微目镜或读数显微镜,则可测定和检验透镜或透镜组的焦距、分辨率及其成像质量.若配以高斯目镜或阿贝目镜,就成为自准直望远镜,可用于微小角度的测量和导轨平直度的检查等.

实验室常用的国产 CPG-500 型平行光管附有高斯目镜和可调式平面反射镜,其光路结构如图 4.2.8 所示.光源发出的光,经分光板后照亮分划板,而分划板被调节到位于物镜的焦平面上.因此,分划板的将成像于无穷远处,即平行光管发出的是平行光束.这可用高斯目镜根据自准直原理来检验.



1.可调式反射镜; 2.物镜; 3.分划板; 4.光阑; 5.分光板;
6.目镜; 7.出射光瞳; 8.聚光镜; 9.光源; 10.十字螺钉

图 4.2.8

550 型平行光管的规格:平行光管物镜焦距 f_0 为 550mm(这是参考值,使用时按实测值),口径 $D=55$mm,相对孔径 $D/f_0=1/10$.高斯目镜焦距 $f'=44$mm,放大倍率为 5.7.

平行光管的主要附件有：

(1) 可调式平面反射镜.它主要是一块直径为100mm的玻璃平面反光镜，装在可以绕左右、上下两个互相垂直的轴线转动(微小角度的转动)的调节架上，调节时每个方向由一个调节螺丝来控制.这种反射镜可在检查调整仪器时应用.

(2) 十字分划板如图4.2.9(a)所示.可以作平行光的调整及装校平行光管时使用.

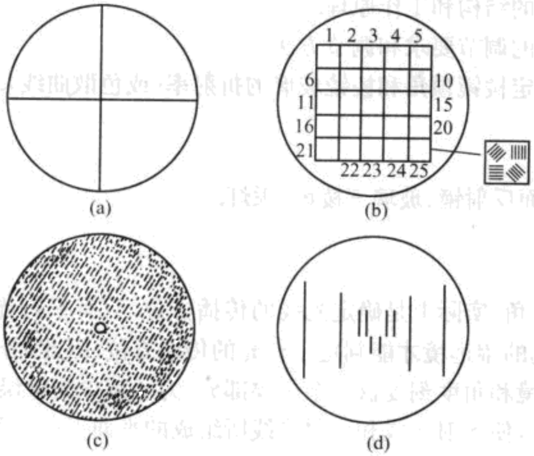


图4.2.9

(3) 鉴别率板如图4.2.9(b)所示.有2号和3号两种，板上有25个图案单元.每个单元由四个条纹方向不同的小方阵组成.各个单元的条纹宽度不同，根据图案单元的编号，可从说明书附表查出相应的条纹宽度.鉴别率板可用于检验物镜、望远镜系统和棱镜的分辨率.

(4) 星点板如图4.2.9(c)所示.星点直径为0.05mm.通过被检光学系统后，产生该星点的衍射花样，根据花样的形状、颜色及清晰度，可对光学元件或组件的成像质量进行定性检查.

(5) 玻罗板如图4.2.9(d)所示.在玻璃基板上用真空镀膜的方法镀有五组线对，各线对间距的参考值分别是1.000mm，2.000mm，4.000mm，10.000mm和20.000mm.使用时，应以出厂的实测值为准.将玻罗板与测微目镜或读数显微镜组合，可用来测定透镜或透镜组的焦距.

实验4.3　分光计的调节和使用

光的反射定律和折射定律定性描述了光线在传播过程中发生偏折时，角度间的相互关系.同时，光在传播过程中的衍射、散射等物理现象也都与角度有关，一些光学量，如折射率、光波波长、色散率等，都可通过直接测量有关的角度去确定.因此，精确测量光线偏折的角度是光学实验技术的重要内容之一.

分光计是一种能精确测量角度的基本光学仪器，常用来测量折射率、光波波长、色散率和观测光谱等.分光计的基本部件和调节原理与其他更复杂的光学仪器(如单色仪、摄谱仪等)有许多相似之处，学习和使用分光计也可为今后使用精密光学仪器打下良好基

础.分光计装置较精密,结构较复杂,调节要求也较高,对初学者来说会有一定难度.但只要注意了解其基本结构,明确调节要求,实验过程中注意观察现象,并运用已有的理论知识去分析、指导操作,定能较好地达到要求.

【实验目的】

(1) 了解分光计的结构和工作原理.

(2) 掌握分光计的调节要求和调节方法.

(3) 用分光计测定棱镜顶角和棱镜玻璃的折射率(或色散曲线).

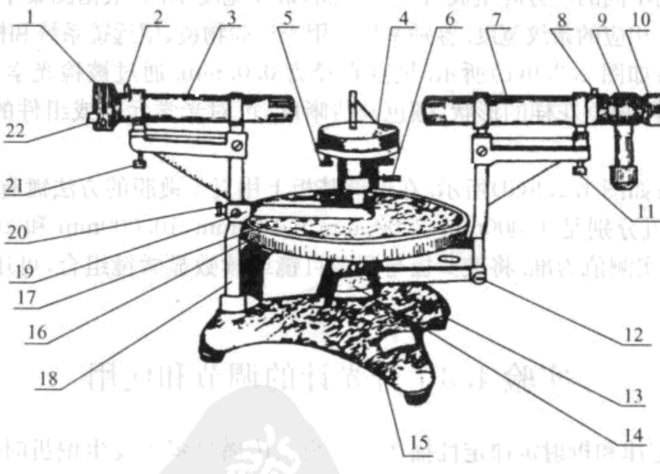
【实验器材】

分光计、平行平面反射镜、玻璃三棱镜、汞灯.

【仪器介绍】

测量光线的偏折角,实际上是确定光线的传播方位.只有平行光才具有确定的方位,也只有调焦于无穷远的望远镜才能判定平行光的传播方位.因此,分光计应包括产生平行光的平行光管、望远镜和角度刻度盘三个主要部分.为了减少测量误差,保证测角精度,应调节分光计有关部件,使入射光线和出射光线所组成的平面平行于刻度盘平面.这就是分光计结构和调节的物理基础.

实验室中常用的JJY型分光计的外形结构如图4.3.1所示,它由五个部件组成:底座、平行光管、望远镜、刻度盘和载物平台.



1. 狭缝;2. 狭缝套筒锁紧螺钉;3. 平行光管;4. 载物台;5. 载物台水平调节螺钉(3只);6. 载物台锁紧螺钉;7. 望远镜;8. 目镜套筒锁紧螺钉;9. 阿贝式自准直目镜;10. 目镜视度调节圈;11. 望远镜水平调节螺钉;12. 望远镜转动微调螺钉;13. 刻度盘制动螺钉;14. 望远镜制动螺钉;15. 底座;16. 刻度盘;17. 游标盘;18. 立柱;19. 游标盘转动微调螺钉;20. 游标盘制动螺钉;21. 平行光管水平调节螺钉;22. 狭缝宽度调节螺钉

图 4.3.1

1. 底座

底座 15 中央有一固定轴(即主轴),刻度盘和游标盘套在主轴上,可绕主轴转动,载物台套在主轴上端,可以升降.

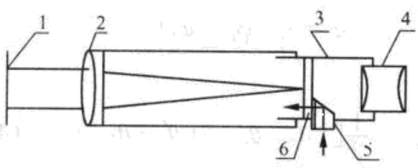
2. 平行光管

平行光管 3 是用来产生平行光的. 它的一端装有消色差物镜,另一端是装有狭缝的套筒,调节螺钉 22 可改变狭缝的宽度,套筒可沿光轴移动和转动,当狭缝正好移动到物镜的第一焦面上时,由狭缝入射的光经物镜后射出平行光束. 调节螺钉 21 可改变平行光管的倾斜度,整个平行光管通过立柱 18 固定在仪器基座上.

3. 自准直望远镜

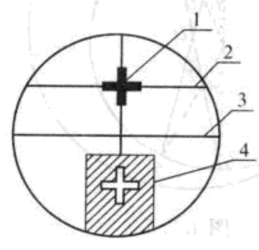
望远镜 7 是用来确定平行光方位的. 它由消色差物镜和阿贝目镜组成,具体结构如图 4.3.2 所示. 物镜装在镜筒的一端,目镜装在另一端的套筒中,目镜套筒可沿光轴前后移动,以便将望远镜调焦于无穷远,即目镜分划板准确位于物镜焦平面上.

阿贝目镜是一个复合目镜,由场镜和接目镜组成. 在它的焦平面附近装有分划板,分划板的形状如图 4.3.3 所示. 旋转目镜视度调节圈 10 可改变目镜和分划板刻线的相对位置,以适应不同观察者的眼睛焦距的差异. 在分划板旁有一刻有透光十字窗的小棱镜 4,光线由小孔进入小棱镜中,从十字窗投射出去,自准直望远镜的反射像为一绿色小十字.



1.反射镜; 2.物镜; 3.目镜套筒; 4.目镜; 5.全反射棱镜; 6.分划板

图 4.3.2



1.十字反射像; 2.叉丝G; 3.叉丝H; 4.绿色十字窗

图 4.3.3

调节螺钉 11 可改变望远镜的倾斜度,使其光轴与仪器主轴垂直. 望远镜通过支架与刻度盘相连,当松开制动螺钉 13 时,望远镜和刻度盘可以相对转动;旋紧时,望远镜和刻度盘一起绕仪器主轴转动. 固定螺钉 13 和 14,调节螺钉 12 可对望远镜进行转动微调.

4. 载物台

载物平台 4 是用来放置棱镜、光栅等光学元件的平台. 载物台套在游标盘上,可绕主轴转动. 旋紧螺钉 6 和 20,调节螺钉 19,还可对载物台进行转动微调. 松开螺钉 6,载物台可根据需要单独绕轴旋转、升降,调到所需位置后,再把螺钉 6 旋紧. 台上有夹持待测物的

弹簧片，台下有三个水平调节螺钉，用来调节平台的倾斜度.

5. 刻度盘与游标盘

套在主轴上的刻度盘和游标盘为分光计的读数装置.

(1) 角游标的读数. JJY 型分光计刻度盘分为 360°，共刻有 720 等份的刻线，最小分格值为 30′. 游标盘上相隔 180°处有两个游标读数刻度，它们各有 30 个分格对应于度盘上 29 个分格值，因此通过游标能读出 1′的角值. 读数方法按游标原理读取，以游标零线为准，在刻度盘上读出度数和分值，再找游标盘上刚好和刻度盘刻线对齐的那条线，得到分值，然后二者相加. 读数示例见图 4.3.4，刻度盘上读数为 139°30′，游标上刻线 14 与刻度盘刻线重合，故读数为 139°44′.

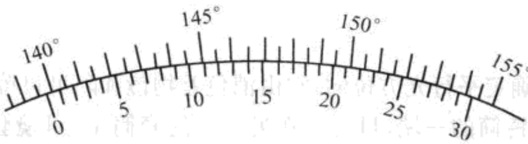


图 4.3.4

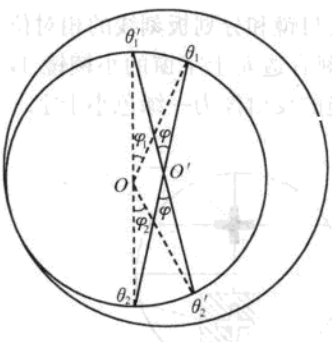


图 4.3.5

(2) 消偏心差为了提高读数精度，每次读数都必须读取两个游标刻度所指示的角度值，然后求平均值，目的是为了消除由于刻度盘刻划中心 O 与其旋转中心 O'（即仪器主轴）不重合所引起的偏心差. 如图 4.3.5 所示，望远镜实际转角为 φ，由于偏心从刻度盘上读出的角度是 φ_1 和 φ_2，由几何关系可得

$$\varphi = \frac{1}{2}(\varphi_1 + \varphi_2)$$

即

$$\varphi = \frac{1}{2}[|\theta_1' - \partial_1| + |\theta_2' - \theta_2|] \qquad (4.3.1)$$

式中，θ_1、θ_2 分别为望远镜初始位置的游标“1”和游标“2”的读数，θ_1'、θ_2'分别为望远镜转过 φ 角后游标“1”和游标“2”的读数.

4.3.1 分光计的调节与三棱镜顶角的测定

【实验原理】

测量三棱镜顶角常采用自准直法和反射法.

1. 自准直法

如图 4.3.6 所示，用△ABC 表示三棱镜的主截面，两光学面 AB 和 AC 称为折射面，

两折射面之间的夹角 A 称为三棱镜的顶角(即棱镜角),BC 面为毛玻璃面,称为底面.

利用望远镜自身产生的平行光和自准直方法测出三棱镜两折射面法线之间的夹角 φ,由图中的几何关系可算出顶角 $A=180°-\varphi$,即

$$A = 180° - \frac{1}{2}[\,|\theta_1' - \theta_1| + |\theta_2' - \theta_2|\,] \tag{4.3.2}$$

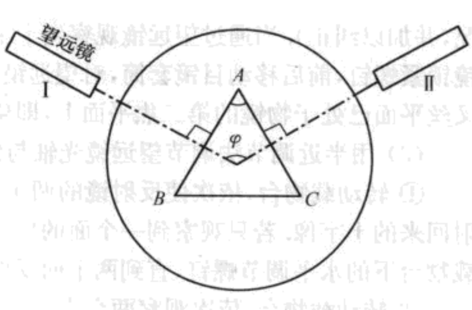


图 4.3.6

2. 反射法

如图 4.3.7 所示,由平行光管出射的平行光束被棱镜的两个折射面分成两部分,图中 i_1、i_2 分别为入射光线与两个折射面的夹角. 设两反射光线的夹角为 φ,由几何关系可得

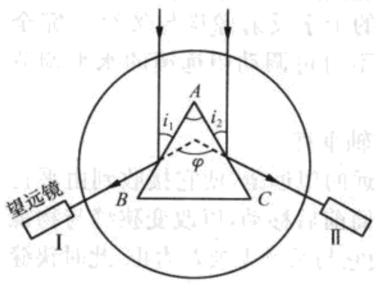


图 4.3.7

$$A = \frac{\varphi}{2} \tag{4.3.3}$$

实验时,用已聚焦于无穷远的望远镜来确定反射光线的方位,从而测出 φ 角,求出顶角 A. 注意:放置三棱镜时,应使三棱镜顶角 A 靠近载物台中心,否则,反射光将不能进入望远镜中.

【实验内容】

1. 分光计的调节

测量前,分光计必须经过仔细调节,达到下述状态:

(1) 平行光管发出平行光,望远镜聚焦于无穷远.

(2) 平行光管和望远镜的光轴均垂直于仪器主轴,即平行于刻度盘.

调节步骤:

(1) 目视粗调,将载物平台、望远镜和平行光管的光轴尽量调至水平状态.

(2) 用自准直法将望远镜调焦于无穷远.

① 通过电源变压器(6V/220V)点亮目镜小灯,调节目镜与叉丝间的距离,使眼睛能清楚地看到十字叉丝.

② 为了方便调节,将平行平面反射镜 M 放置于载物台上,使它位于任意两水平调节螺钉(如 a_2、a_3)的中垂线上(图 4.3.8). 将望远镜正对平面反射镜,通过望远镜观察由平面镜反射回来的绿色小十字像. 若观察不到,则应改变望远镜及载物台的倾斜度,找到反射像(也可在望远镜筒外用眼睛直接从平面镜内观察,判断反射像偏离望远镜光轴的情

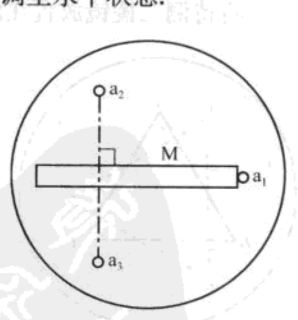


图 4.3.8

况,并加以纠正).当通过望远镜观察到十字反射像后(此时反射像一般不清晰),再放松目镜锁紧螺钉,前后移动目镜套筒,对望远镜进行调焦,使反射像清晰且与叉丝无视差.此时叉丝平面已处于物镜的第二焦平面上,即望远镜已调焦于无穷远.

(3) 用半近调节法调节望远镜光轴与仪器主轴垂直.

① 转动载物台,依次使反射镜的两个镜面正对望远镜,通过望远镜观察由两个面反射回来的十字像.若只观察到一个面的反射像,则需进一步调节望远镜的水平调节螺钉或载物台下的水平调节螺钉,直到两个面反射的十字像都在望远镜视场中.

② 转动载物台,依次观察两个十字反射像在望远镜视场中的位置,采用半近调节法调节:从两个反射像中找出偏离叉丝上方横线(图 4.3.3 中的叉丝 G)最大的那一个,先调节望远镜的水平调节螺钉,使反射像与叉丝 G 之间的上下距离移近一半,再调节载物台下的螺钉 a_2(或 a_3),使十字像与叉丝 G 重合(图 4.3.3).然后将载物台转过 180°,使平面镜另一面正对望远镜,用同样的方法调节望远镜的倾斜度和螺钉 a_3(或 a_2),使十字像与叉丝 G 重合.如此反复几次,直至平面镜转过 180°前后的十字反射像均与叉丝 G 完全重合,此时望远镜的光轴已垂直于仪器的主轴了(此后不得再调动望远镜的水平调节螺钉).

(4) 调节平行光管发出平行光,并使其光轴与仪器主轴垂直.

① 用光源照明平行光管的狭缝,转动已调焦于无穷远的望远镜,使它接收到由平行光管射出的光束,然后放松狭缝套筒锁紧螺钉,使狭缝套筒前后移动,以改变狭缝与物镜之间的距离,直到从望远镜中能观察到清晰的狭缝像并使它与叉丝无视差为止.此时狭缝位于物镜的前焦面上,平行光管发出平行光.

② 转动狭缝套筒,使狭缝呈水平状态.再调节平行光管的倾斜度,使狭缝像与望远镜中的叉丝中心横线(图 4.3.3 中叉丝 H)重合,然后再将狭缝转到垂直位置,使狭缝像与叉丝竖线平行,此时平行光管光轴与望远镜光轴重合即与仪器主轴垂直.最后将狭缝宽度调至约 1mm,并随即固定狭缝套筒锁紧螺钉.

至此,分光计已调节完毕,在测量过程中不得破坏,否则将前功尽弃.

2. 测定三棱镜顶角

1) 调节三棱镜使其主截面垂直于分光计主轴

将待测三棱镜放置在已调好的分光计载物台上,为了利于调节,应使其三边垂直于载物台下三个螺钉的连线,如图 4.3.9 所示.借助于调好的望远镜,用自准直法调节三棱镜主截面的位置:先用目测调节螺钉 a_1、a_2 和 a_3,尽量使载物台水平;然后转动载物台使 AB 面正对望远镜,仅调 a_1 使 AB 面反射的十字像与叉丝 G 重合,也就是使 AB 面垂直于望远镜的光轴;再转动载物台使 AC 面正对望远镜,仅调 a_3 使 AC 面垂直于望远镜的光轴.如此反复几次,直到 AB、AC 两光学面反射回来的十字像都与叉丝 G 完全重合为止.这样三棱镜的光学面 AB 和 AC 都与仪器主轴平行,因而三棱镜的主截面与仪器主轴垂直.

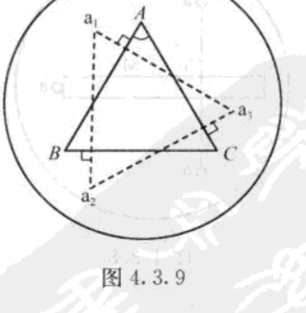


图 4.3.9

2）测顶角 A

（1）自准直法. 如图4.3.6所示，固定载物台（与游标盘相连），转动望远镜（与刻度盘相连），使 AB 面反射回来的十字像与叉丝G完全重合（图4.3.3），记录两游标的读数 θ_1、θ_2；然后再转动望远镜使 AC 面反射的十字像与叉丝G完全重合，记录两游标的读数 θ_1'、θ_2'，利用公式（4.3.2）计算 A 角.

重复测量3次，求出 A 角的平均值. 也可采用固定望远镜，转动载物台进行测量.

（2）反射法. 如图4.3.7所示，自行设计实验步骤，测量两反射光线之间的夹角 φ，利用公式（4.3.3）计算顶角 A.

重复测量3次，求出 A 角的平均值，并与自准直法测得的结果进行比较.

4.3.2 用最小偏向角法测玻璃三棱镜的折射率和色散曲线

【实验原理】

棱镜玻璃的折射率，可用测定最小偏向角的方法求得. 如图4.3.10所示，$\triangle ABC$ 是三棱镜的主截面，波长为 λ 的光线以入射角 i_1 投射到棱镜的 AB 面上，经 AB 和 AC 两个面折射后以 i_1' 角从 AC 面出射，出射光线与入射光线的夹角 δ 称为偏向角. δ 的大小随入射角 i_1 而改变. 在入射光线和出射光线处于光路对称的情况下，即 $i_1=i_1'$ 时，偏向角有极小值，记为 $\delta_{\min}$. 可以证明，棱镜玻璃的折射率 n 由下式给出

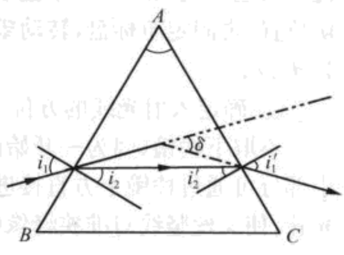


图 4.3.10

$$n=\frac{\sin\dfrac{A+\delta_{\min}}{2}}{\sin\dfrac{A}{2}} \tag{4.3.4}$$

式中，A 为棱镜顶角，$\delta_{\min}$ 称为最小偏向角.

若入射光为非单色光，则经棱镜折射后，不同波长的光将产生不同的偏向而被分散开来，这就是色散现象. 因此，最小偏向角 $\delta_{\min}$ 与入射光的波长有关，折射率也随不同波长而变化. 折射率 n 与波长 λ 之间的关系曲线称为色散曲线. 实验时，只要测出 A 和 $\delta_{\min}(\lambda)$，由（4.3.4）式计算相应的折射率 $n(\lambda)$ 值，就可作出该棱镜材料的色散曲线.

本实验以高压汞灯为光源，各谱线的波长见实验5.13.

【实验内容】

（1）调节分光计到使用状态调节方法见4.3.1（如状态未破坏可不再重新调节）.

（2）调节三棱镜的主截面与分光计主轴垂直. 为了下面的测量需要，宜将载物台放低些.

（3）测定最小偏向角 $\delta_{\min}$.

① 确定出射光线的方位.

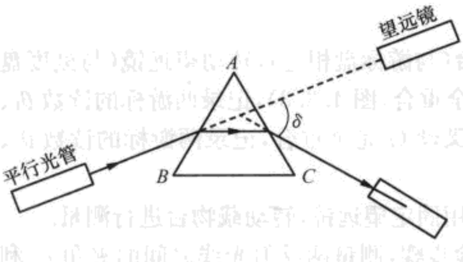


图 4.3.11

用汞灯照亮平行光管狭缝，将载物台与游标盘固定在一起，望远镜与刻度盘固定在一起. 转动游标盘，使棱镜处于如图 4.3.11 所示的位置，先用眼睛沿着棱镜出射光线方向寻找经棱镜折射后的狭缝像，找到后再将望远镜移至眼睛所在的位置，此时可在望远镜中观察到汞灯经棱镜 AB 和 AC 面折射后形成的光谱（即按不同波长依次排列的狭缝的单色像）.

将望远镜对准其中的某一条谱线（如绿色谱线 $\lambda=546.1\text{nm}$），慢慢转动游标盘，以改变入射角 i_1，使绿色谱线往偏向角减小的方向移动，同时转动望远镜跟踪谱线，直到载物台继续沿原方向转动时，绿色谱线不再向前移动反而向相反方向移动（偏向角反而增大）为止. 这条谱线移动的反向转折位置就是棱镜对该谱线的最小偏向角的位置. 然后将望远镜的叉丝竖线大致对准绿色谱线，固定望远镜，微调游标盘，找出绿色谱线反向转折的确切位置. 再固定游标盘，转动望远镜，使其叉丝竖线与绿色谱线中心对准，记下两游标的读数 θ_1、θ_2.

② 确定入射光线的方位.

不取下棱镜（因为一开始已将载物台调得较低，所以由平行光管出射的光束，其中一小部分可通过棱镜上方直接进入望远镜中），仍使游标盘固定，转动望远镜直接对准平行光管，使叉丝竖线对准狭缝像中心，记下此时两游标的读数 θ_1'、θ_2'，则

$$\delta_{\min}=\frac{1}{2}[\,|\theta_1'-\theta_1|+|\theta_2'-\theta_2|\,] \tag{4.3.5}$$

即为绿色谱线所对应的最小偏向角.

③ 重复步骤①、②测量 3 次，计算 $\bar{\delta}_{\min}$，数据录入表 4.3.1.

(4) 测定汞灯其他几条谱线对应的最小偏向角 $\bar{\delta}_{\min}(\lambda)$.

【数据处理】

表 4.3.1

三棱镜编号________ $A=$________

汞谱线波长/nm	测量序号	出射光方位读数		入射光方位读数		$\delta_{\min}=\frac{1}{2}[\|\theta_1-\theta_1'\|+\|\theta_2-\theta_2'\|]$	$\bar{\delta}_{\min}$	n
		θ_1	θ_2	θ_1'	θ_2'			
435.8	1							
	2							
	3							
496.0	1							
	2							
	3							

续表

汞谱线波长/nm	测量序号	出射光方位读数		入射光方位读数		$\delta_{\min}=\frac{1}{2}[\lvert\theta_1-\theta_1'\rvert+\lvert\theta_2-\theta_2'\rvert]$	$\overline{\delta}_{\min}$	n
		θ_1	θ_2	θ_1'	θ_2'			
546.1	1							
	2							
	3							
577.0	1							
	2							
	3							
579.1	1							
	2							
	3							
623.5	1							
	2							
	3							

(1) 由公式(4.3.4)推导出折射率 n 的不确定度 U_n 的表达式，并根据仪器的测量精度(分光计的读数误差可取它的分度值 $1'$)估计出 U_A 和 U_B 代入并估计出 U_n，据此决定 n 应取几位有效数字.

(2) 计算棱镜材料对各波长的折射率 $n(\lambda)$，并画出色散曲线.

【预习思考】

(1) 已调好的分光计应处于何种状态？为什么要处于这种状态？

(2) 调节光学仪器的一般要领是先粗调后细调，本实验中分光计的调节是如何体现这一要领的？

(3) 用自准直法将望远镜调焦到无穷远的主要步骤是什么？用什么方法判断望远镜已调焦于无穷远？

(4) 借助平面镜调节望远镜光轴与分光计主轴垂直时，为什么要将载物台旋转 $180°$ 使平面镜两面的十字反射像均与目镜叉丝 G 线重合？只调一面行吗？

(5) 读取两游标读数为什么能消除仪器的偏心差？计算角度时，应特别注意什么？

(6) 分光计既然已调好，测顶角 A 时，为什么还要调节三棱镜的主截面使之垂直于仪器主轴？

(7) 对同一种材料来说，红光和紫光中哪个波长的折射率小？哪个的偏向角小？当转动棱镜找最小偏向角时，应使谱线向着红光移动，还是向着紫光移动？

【习题】

(1) 调节望远镜光轴与仪器主轴垂直时，当载物台转过 $180°$ 前后，由平面镜两镜面依次反射回来的十字像处于下列情况：①一个位于叉线 G 的上方，另一个位于叉丝 G 的下方，且两者与叉丝的距离相等；②两个十字像均位于视场同一位置但又不与叉丝 G 重合.试问，在这两种情况下，望远镜光轴与仪器主轴是否垂直？平面镜的镜面法线与仪器主轴

是否垂直？若要使两个十字像均与叉丝G重合，该如何正确调节？

(2) 转动望远镜时，如果一游标由 θ_1 转到 θ_1'，中间经过了刻度盘中0°(360°)，那么该如何利用公式(4.3.1)计算 φ 值？

(3) 一束非单色平行光以某一角度入射到三棱镜上，若出射光束某一谱线处于最小偏向角的位置，此时其他谱线是否也处于最小偏向角的位置？为什么？实验中可否先测出入射光线的方位(θ_1'、θ_2')，然后再分别测出各条谱线的出射光的方位(θ_1、θ_2)？为什么？

(4) 根据所测数据和有关公式自编程序，上机操作并打印色散曲线.

实验4.4　用阿贝折射仪测定物质的折射率

【实验目的】

(1) 了解阿贝折射仪的结构和测量原理，熟悉其使用方法.

(2) 用阿贝折射仪测量液体(不同温度下)的折射率和固体的折射率.

【实验器材】

阿贝折射仪、白炽灯、恒温水浴、温度计、待测液体(酒精、甘油、石蜡等)、待测固体(透明玻璃块).

【仪器介绍】

阿贝折射仪是测量物质折射率的专用仪器，它能快速而准确地测出透明、半透明液体或固体材料的折射率(测量范围一般为1.300～1.700)，它还可以与恒温、测温装置连用，测定折射率随温度的变化关系.

阿贝折射仪的光学系统由望远系统和读数系统组成，如图4.4.1所示.

望远系统.光线经反射镜1反射进入进光棱镜2及折射棱镜3，待测液体放在2与3之间，经阿米西色散棱镜组4以抵消由于折射棱镜与待测物质所产生的色散，通过物镜5将明暗分界线(明暗分界线的形成见实验原理)成像于分划板6上，再经目镜7、8放大后为观察者所观察.

读数系统.光线由小反射镜14经毛玻璃13照明刻度盘12，经转向棱镜11及物镜10将刻度(有两行刻度，一行是折射率，另一行是百分浓度，是测量糖溶液浓度专用的)成像于分划板9上，经目镜7′、8′放大成像于观察者眼中.

阿贝折射仪的外形结构如图4.4.2所示.

【实验原理】

阿贝折射仪是根据全反射原理设计的，有透射光(掠入射)与反射光(全反射)两种使用方法.

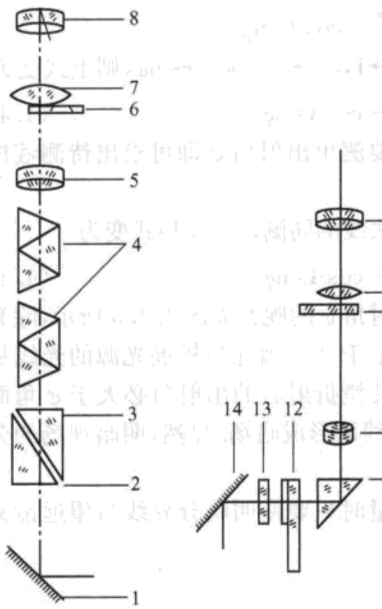
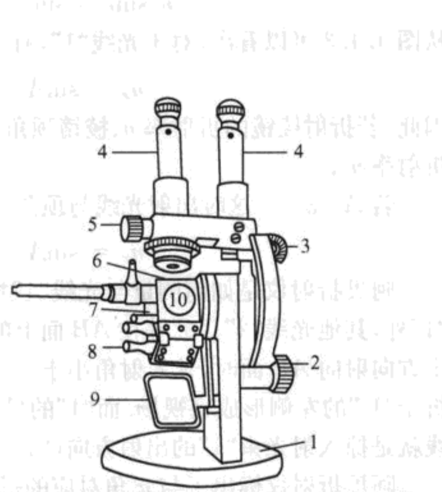


图 4.4.1



1.基座；2.阿贝棱镜组及刻度盘手轮；3.读数照明反射镜；4.望远镜；5.阿米西棱镜调节手轮；6.棱镜组锁紧扳手；7.阿贝棱镜组；8.恒温器接头；9.反光镜；10.全反射照明窗口

图 4.4.2

1. 测定液体的折射率

若待测物为透明液体，一般用透射光即掠入射方法来测量其折射率 n_x.

阿贝折射仪中的阿贝棱镜组由两个直角棱镜(折射率为 n)组成，一个是进光棱镜，它的弦面是磨砂的，其作用是形成均匀的扩展面光源；另一个是折射棱镜. 待测液体($n_x<n$)夹在两棱镜的弦面之间，形成薄膜. 如图 4.4.3 所示，光先射入进光棱镜，由其磨砂弦面 $A'B'$ 产生漫射光穿过液层进入折射棱镜(图中 ABC). 因此，到达液体和折射棱镜的接触面(AB 面)上任意一点 E 的诸光线(如 1、2、3 等)具有各种不同的入射角，最大的入射角是 90°，这种方向的入射称为掠入射. 对不同方向入射的某条光线，设它以入射角 i 射向 AB 面，经棱镜两次折射后，从 AC 面以 φ' 角出射，若 $n_x<n$，则由折射定律得

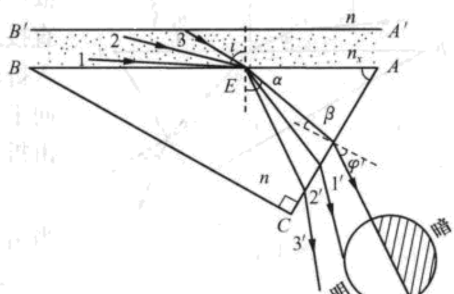


图 4.4.3

$$n_x \sin i = n \sin\alpha$$

$$n \sin\beta = \sin\varphi'$$

式中，α 为 AB 面上的折射角，β 为 AC 面上的入射角，如图 4.4.3 所示，得棱镜顶角 A 与 α 角及 β 角的关系为

$$A = \alpha + \beta$$

从以上三式消去 α 和 β 得

$$n_x \sin i = \sin A \sqrt{n^2 - \sin^2\varphi'} - \cos A \sin\varphi'$$

从图 4.4.3 可以看出，对于光线"1"，有 $i \to 90°$，$\sin i \to 1$，$\varphi' \to \varphi$，$\sin\varphi' \to \sin\varphi$，则上式变为

$$n_x = \sin A \sqrt{n^2 - \sin^2\varphi} - \cos A \sin\varphi \qquad (4.4.1)$$

因此，若折射棱镜的折射率 n、棱镜顶角 A 已知，只要测出出射角 φ 即可求出待测液体的折射率 n_x.

若 $A=\alpha-\beta$，这时出射光线与顶角 A 在 AC 面法线的同侧，(4.4.1)式变为

$$n_x = \sin A \sqrt{n^2 - \sin^2\varphi} + \cos A \sin\varphi \qquad (4.4.2)$$

阿贝折射仪是如何测量与光线"1"相对应的出射角 φ 的呢？如图 4.4.3 所示，除光线"1"外，其他光线"2"、"3"等在 AB 面上的入射角皆小于 90°. 因此当扩展光源的光线从各个方向射向 AB 面时，凡入射角小于 90°的光线，经棱镜折射后的出射角必大于 φ 角而偏折于"1′"的左侧形成亮视场. 而"1"的另一侧因无光线而形成暗场. 显然，明暗视场的分界线就是掠入射光束"1"的出射方向("1′").

阿贝折射仪标出了与 φ 角对应的折射率值，测量时只要使明暗分界线与望远镜叉丝交点对准，就可从读数装置上直接读出 n_x 值.

2. 测定固体的折射率

若待测固体有两个互成 90°角的抛光面，则可用透射光测定其折射率 n_x. 如图 4.4.4 所示，在待测固体和折射棱镜 AB 面之间滴一滴接触液(其折射率设为 n_2，要求 $n_2>n_x$)，扩展光源发出的光直接进入待测固体(不用进入进光棱镜)，经过接触液进入折射棱镜，其中一部分光线在通过待测固体时，传播方向平行于固体与接触液的交界面. 当 $n_x<n_2$，$n_x<n$ 时，由折射定律和几何关系可得待测固体折射率为

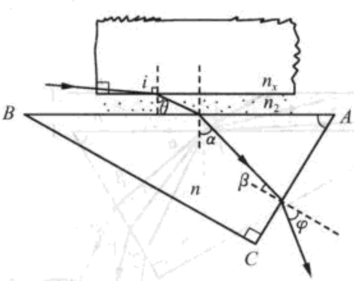


图 4.4.4

$$n_x = \sin A \sqrt{n^2 - \sin^2\varphi} \mp \cos A \sin\varphi \qquad (4.4.3)$$

当出射光线与顶角 A 分居于 AC 面法线的两侧时，(4.4.3)式取"－"号，如图 4.4.4 所示；反之，若在同侧时，(4.4.3)式取"＋"号.

由于折射棱镜的 n 和 A 均已知，只要测出光线掠入射经过待测固体时，由棱镜 AC 面上的出射极限角 φ，即可算出待测固体的折射率. 用阿贝折射仪测量时，只要使明暗分界线与望远镜叉丝交点对准，就可直接读出 n_x 值.

接触液的存在并不影响 n_x 的测量，但要求其折射率 $n_2>n_x$. 接触液的作用是使待测样品面和折射棱镜面形成良好的光学接触，没有空隙且有黏附性.

此外，用反射光测定折射率的原理如图 4.4.5 所示，光由折射棱镜的磨砂面 BC 进入，此时 BC 面就成为一个扩展面光源，到达 AB 面(与待测物质的接触面)上任意一点的诸光线具有不同的入射角，凡入射角大于

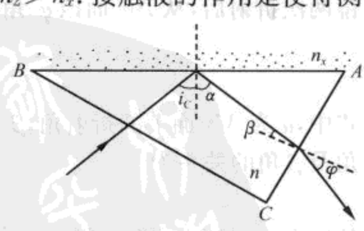


图 4.4.5

临界角 $i_C\left(i_C=\arcsin\frac{n_x}{n}\right)$ 者，皆全反射，再经 AC 面射出，用望远镜对准 φ 角方向，同样会观察到明暗视场，但明暗差别不如透射光. 用反射光测量固体的折射率时，只需一个抛光面.

任何物质的折射率都与测量时使用的光波波长有关. 阿贝折射仪因有光补偿装置(阿米西棱镜组)，所以测量时可用白光光源，且测量结果相当于对钠黄光($\lambda=589.3$nm)的折射率(即 n_D). 另外，液体的折射率还与温度有关.

【实验内容】

阿贝折射仪在使用之前，需用标准玻璃块或标准液体校正仪器读数. 校正方法如下：根据测固体折射率的方法(图 4.4.4)，将一已知 n_D 的标准玻璃块(仪器附件，n_D 的数值标在玻璃块上)的抛光面上加一滴接触液(溴代萘)，贴在折射棱镜的弦面 AB 上，让标准玻璃块的另一抛光面接收入射光线，当读数目镜内的读数与标准玻璃块的 n_D 的值相等时，观察望远镜内明暗分界线是否在十字叉丝中间，若有偏差则用方孔调节扳手转动示值调节螺钉，使明暗分界线调整至中央(图 4.4.6)，这时仪器读数就校正好了.

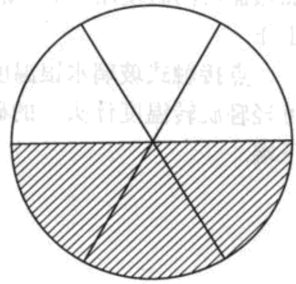


图 4.4.6

1. 测定液体的折射率

(1) 测量前，转动棱镜锁紧扳手，打开棱镜组，用脱脂棉花沾一些无水酒精将进光棱镜及折射棱镜弦面轻轻擦洗干净. 以免留有其他物质，影响测量精度.

(2) 开动恒温水浴(使用方法见附录)，使棱镜组达到测量时需要的温度.

(3) 用滴管把待测液体加一滴在进光棱镜磨砂面上. 合拢棱镜组后，转动棱镜锁紧扳手使棱镜组锁紧. 要求液膜均匀、无气泡且充满视场，待液体热平衡后即可测量.

(4) 用白炽灯照明，调节两反光镜，使望远镜与读数目镜视场明亮.

(5) 旋转棱镜及刻度盘转动手轮，使棱镜组转动，这时在望远镜视场中可观察到明暗分界线随着上下移动，旋转阿米西棱镜手轮，使视场中除黑白二色外无其他颜色. 将分界线对准十字叉丝交点，读出目镜视场右边所示的刻度值，即为待测液体在该温度下的折射率 n_D.

(6) 测出三种液体(如酒精、甘油、石蜡等)在不同温度下的折射率(本实验仪器可测温度范围为 10～50℃).

根据实验结果分析待测液体折射率随温度的变化关系.

注意：①每次更换被测液体，都要用酒精棉花清洗棱镜组，待酒精干后再加入另一种液体. ②需要改变温度时，先把恒温器的温度调节到所测量的温度，待温度稳定 10min 后，才可进行测量.

2. 自行设计实验步骤，测定固体(玻璃块)的折射率

【习题】

(1) 阿贝折射仪测定折射率的理论依据是什么？如待测物质的折射率大于折射棱镜

的折射率，能否用阿贝折射仪测定？为什么？试讨论本实验所能测定折射率的范围.

(2) 试分析望远镜中观察到的明暗视场分界线是如何形成的？

(3) 用掠入射法求 n_x 的公式是否同样适用于反射法？

(4) 阿贝折射仪中的进光棱镜起什么作用？

【附录】 超级恒温水浴使用说明

超级恒温水浴适用于精密直接加热和辅助加热使用. 一般情况下，开始加热时，每组加热器可同时使用. 当开始控温时(如指示灯熄灭)，应选择适当功率的一组加热器来维持工作.

点接触式玻璃水银温度计被用来控制水浴温度. 当要调节到某一需要控制的温度时，可轻轻旋转温度计头上的磁帽来实现. 磁帽不可急促转动，也不可将温度指示器旋至最下端.

实验 4.5 显 微 镜

显微镜和望远镜都是常用的助视光学仪器. 显微镜主要是用来帮助人眼观察近处的微小物体，而望远镜则主要是帮助人眼观察远处的目标. 它们的作用均在于增大被观察物体对人眼的张角，起着视角放大的作用. 通过本实验可以了解并掌握显微镜的构造原理，进一步熟悉透镜成像规律，也有助于加强对光学仪器的调整和使用的训练.

【实验目的】

(1) 熟悉显微镜的构造及原理.

(2) 掌握显微镜的正确使用方法和放大率的测定，学会用生物显微镜测量微小长度.

(3) 验证显微镜的分辨本领和物镜数值孔径的关系，进一步理解分辨本领和数值孔径的含义.

【实验原理】

图 4.5.1 是显微镜的原理光路图，它由两个透镜组(即物镜和目镜)组成. 被观察的物

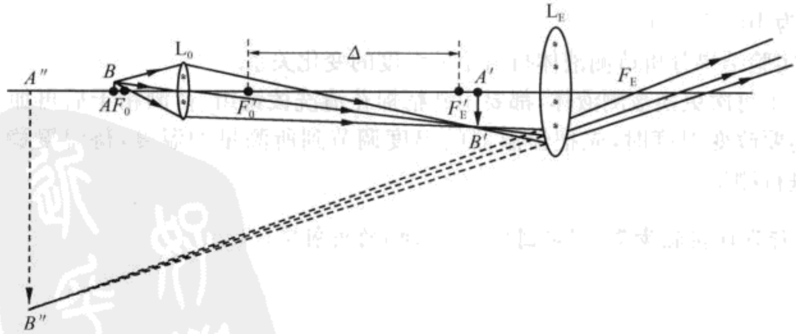


图 4.5.1

体 AB 放在物镜 L_0 物方焦点 F_0 外侧附近，它经物镜成倒立实像 $A'B'$ 于目镜 L_E 物方焦点 F_E 的内侧，再经目镜成放大虚像 $A''B''$ 于人眼的明视距离处. 实际使用的显微镜，它的物镜和目镜都是经精确校正的复合透镜组. 为了突出其基本原理，在图中仅以薄透镜表示.

1. 显微镜的视角放大率 M

理论计算可得显微镜的放大率 M 为

$$M = M_0 \cdot M_E = -\frac{\Delta}{f'_0} \cdot \frac{s_0}{f_E} \tag{4.5.1}$$

式中，M_0 为物镜的横向放大率，M_E 为目镜的视角放大率，f'_0 和 f'_E 分别为物镜和目镜的第二焦距，Δ 称为显微镜的光学筒长（Δ 为 F'_0 和 F_E 之间的距离，通常为 17cm 或 19cm），$s_0=25\text{cm}$，为正常人眼的明视距离，负号表示像是倒立的. 上式表明，物镜、目镜的焦距越短，光学筒长越大，显微镜的放大倍率越高. 通常将物镜、目镜的放大率和光学筒长的值标在镜头上，以供选用.

测定放大率的方法是

(1) 测定显微镜的放大率 M. 在垂直于显微镜光轴方向距离目镜 25cm 处置一毫米尺（1mm 分格），在物镜前置一微尺（0.01mm 分格），使显微镜对微尺调焦，然后用一只眼睛直接看毫米尺，另一只眼睛通过显微镜观察微尺的像，经过多次观察，当微尺的放大像正好落在毫米尺上，且无视差时，若微尺上的 n 个分格恰好等于毫米尺上的 N 个分格，则显微镜的放大率为

$$M = -\frac{N}{n} \times 100 \tag{4.5.2}$$

(2) 测定显微镜物镜的放大率 M_0. 用测微目镜代替显微镜原配套目镜，在物镜前放一微尺，使显微镜对微尺调焦. 设微尺上的 L 长度经物镜放大后的像长为 L'，用测微目镜测出 L'，则物镜的放大率为

$$M_0 = -\frac{L'}{L} \tag{4.5.3}$$

若 M_0、L' 已知，则可利用上式求出 L，即可利用显微镜来测量微小长度.

2. 显微镜的分辨本领

显微镜的分辨本领是用最小分辨距离 δ_y（即刚能分辨时两物点之间的距离）来表示. 它是指显微镜的物镜区分微小细节的能力，对于像差校正完善的物镜，由衍射理论和瑞利判据可以导出

$$\delta_y = \frac{0.61\lambda}{n\sin\theta} \tag{4.5.4}$$

式中，λ 为光的波长，n 为物方折射率，θ 为轴上物点对物镜入射孔径的半张角. 通常把 $n\sin\theta$ 称为数值孔径，用符号 $N.A.$ 表示，其具体数值常标在镜头上.

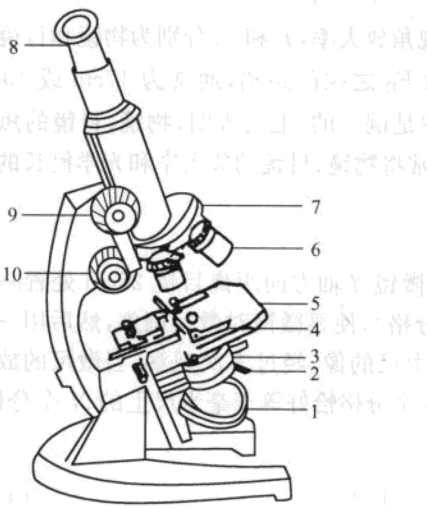
4.5.1 测定显微镜的放大率和用显微镜测定微小长度

【实验器材】

生物显微镜、毫米尺、标准微尺、生物样品、光栅.

【仪器介绍】

常用的生物显微镜的外形结构如图 4.5.2 所示，主要由三部分组成：



1.反射镜；2.可变光阑；3.聚光镜；4.样品夹；5.载物台；6.物镜；7.转换器；8.目镜；9.粗调手轮；10.微调手轮

图 4.5.2

(1) 照明系统. 由反射镜 1、可变光阑 2 和聚光镜 3 组成. 反射镜将外来光线导入聚光镜，并由聚光镜会聚，以照亮被测物.

(2) 载物台 5. 台上装有样品夹 4，可用它前后、左右移动样品，移动距离可由标尺读出.

(3) 显微镜筒. 镜筒两端装有物镜 6 和目镜 8，目镜和物镜均为复杂的透镜组. 将原来目镜顺镜筒拔出，可更换不同放大率的目镜. 物镜装在转换器 7 上，转动转换器可更换不同放大率的物镜. 显微镜通常配有不同放大率的物镜和目镜各一套. 常用目镜的放大率分别为5×、10×、15×(或 12.5×)，物镜放大率为10×、40×、100×(或8×、45×、100×). 由目镜和物镜的相互组合，可以得到不同的放大率.

转动手轮 9，显微镜镜筒可上下移动，用于**粗调调焦**；转动手轮 10，镜筒可上下缓慢移动，用于**微调调焦**.

显微镜的调焦必须遵照下列操作规程：①需要使用高倍物镜时，先用低倍物镜进行观察调节. 因为高倍物镜的景深小，视场小而暗，不易找到被观察物的像，故先用低倍物镜观察，当观察到较清晰的像后，再更换高倍物镜观察. ②显微镜的工作距离很小，特别是高倍观察时的工作距离常在零点几毫米左右. 调焦一不小心，就可使物镜与样品接触而受到挤压，造成损坏. 因此规定：粗调调焦时，**先从显微镜旁监视，转动粗调手轮，使物镜镜头慢慢靠近样品而不接触；然后从目镜中观察，并缓慢转动粗调手轮使物镜与样品离开**，当视场中刚出现物体像的轮廓时，再改用微调手轮调到像最清晰为止. ③转动微调手轮时，若有限制感觉，则应反向转动使用. 否则，会使微调失灵而损坏仪器.

【实验内容】

1. 显微镜的使用和放大率的测定

(1) 将各倍率的物镜装于物镜转换器上，选择适当倍率的目镜插入显微镜镜筒中.

(2) 将生物样品置于载物台上夹住，调节反射镜、可变光阑及聚光镜，使视场均匀，亮度适当.

(3) 先用低倍物镜对物进行调焦，先粗调后微调，直至目镜视场中观察到清晰的像. 调节样品移至视场中心进行观察.

(4) 转动转换器，换用高倍物镜观察，调节微调手轮，直到观察的像最清晰.

(5) 取下生物样品，换上标准微尺(微尺全长 1mm，分格值为 0.01mm)，测定显微镜的放大率 M.

2. 测量微小长度

(1) 将显微镜上原有目镜顺镜筒拔出，换上测微目镜，选用放大倍率为 10× 的物镜. 调好照明系统，然后使显微镜对标准微尺调焦.

(2) 测定物镜的放大倍数 M_0. 先调节测微目镜中刻度与微尺刻度平行；再用测微目镜测量微尺上的 n 格经物镜放大后的像的大小，设为 L'/mm，那么物镜的放大倍数 $M_0=100L'/n$. 可选用标准微尺上不同的 n 值，重复测量 3 次，取其平均值.

(3) 取下标准微尺，换上被测样品(如光栅). 调焦后，测出被测样品经物镜放大后的像的大小(光栅像的刻线间距值) y'，再计算未知长度 $y=y'/M_0$. 重复测量 3 次，取其平均值.

4.5.2　验证显微镜的分辨本领与物镜数值孔径的关系

【实验器材】

读数显微镜、一组不同孔径的小孔光阑、2 号鉴别率板、高度尺(可夹持光阑，其高度可调).

【实验内容】

由(4.5.4)式可知，对于给定的 λ、n，显微镜的分辨本领或物镜数值孔径的测量，实际上是测定该物镜对轴上物点的张角 2θ. 常规的方法是采用数值孔径计测量. 本实验采用在读数显微镜(其结构和使用说明见实验 4.7 附录)物镜前加限制光阑来测定最小分辨距离 δ_y，验证显微镜分辨本领与物镜数值孔径的正比关系.

1. 测量显微镜在附加不同圆孔光阑时的最小分辨距离 δ_y

(1) 把 2 号鉴别率板(说明见实验 4.2 附录)放在读数显微镜的载物台上，调节照明系统并调焦，使显微镜视场中出现清晰的鉴别率板像，并使图像在视场正中.

(2) 将有一组不同直径的小孔光阑的铜片固定在高度尺上，让其中一个小孔紧贴在物镜前，调节它的前后、左右位置，使之与显微镜共轴(调节方法：先使光阑位置不动，调显微镜看清光阑，移动光阑，使圆孔中心与视场中心重合，再重新把显微镜调焦到鉴别率板上). 记下此时光阑在高度尺上的位置 Z_1.

(3) 从显微镜视场中寻找刚能被分辨出线条的方块，记下该组编号(一共有 25 组，每组有 4 个小方块，只要有一个方块看出线条就算该组能被分辨). 从附表中查出该组编号所对应的线条间距值(表中刻纹宽度为 a，则线间距为 $2a$). 这个数值便是显微镜加该光阑后最小分辨距离 δ_y.

(4) 重复步骤(2)、(3)，依次测出附加不同光阑后显微镜的最小分辨距离.

2. 测物镜在附加光阑时的数值孔径(要求只测附加某一圆孔光阑时的 N. A. 值)

(1) 测光阑到鉴别率板分划线所在平面的间距 Z. 方法是：把鉴别率板移离载物台，将光阑(仍与高度尺相连)由高度 Z_1 下降到鉴别率板的高度位置(此时可看清小孔光阑的像)，记下此时光阑在高度尺上的位置 Z_2，那么，$Z=|Z_1-Z_2|$.

(2) 用读数显微镜测量光阑圆孔的直径 $2R$.

(3) 计算 $n\sin\theta$ 值. 因为 $n=1$，θ 很小，所以 $n\sin\theta\approx n\tan\theta=\dfrac{R}{Z}$，代入所测得的 R、Z 值计算出加该光阑时物镜的数值孔径. 并利用(4.5.4)式计算 δ_y(取 $\bar{\lambda}=550.0\text{nm}$)，与上面同一光阑所测得的结果进行比较.

【习题】

(1) 显微镜的调焦应遵守什么规则?

(2) 用生物显微镜测量未知长度时，用测微目镜代替原配套目镜，为什么要重新测量物镜的放大倍数?

【附录】　鉴别率板条纹宽度及最小分辨角

鉴别率板号		2 号		3 号	
鉴别率板单元号	单元中每一组的条纹数	条纹宽度/μm	当平行光管 f=550 时鉴别率角值/(″)	条纹宽度/μm	当平行光管 f=550 时鉴别率角值/(″)
1	4	20.0	15.00	40.0	30.00
2	4	18.9	14.18	37.8	28.35
3	4	17.8	13.35	35.6	26.70
4	5	16.8	12.60	33.6	25.20
5	5	15.9	11.93	31.7	23.78
6	5	15.0	11.25	30.0	25.50
7	6	14.1	10.58	28.3	21.23
8	6	13.3	9.98	26.7	20.03
9	6	12.6	9.45	25.2	18.90
10	7	11.9	8.93	23.8	17.85
11	7	11.2	8.40	22.5	16.88
12	8	10.6	7.95	21.2	15.90
13	8	10.0	7.50	20.0	15.00
14	9	9.4	7.05	18.9	14.18
15	9	8.9	6.68	17.8	13.35
16	10	8.4	6.30	16.8	12.60

续表

鉴别率板号		2号		3号	
鉴别率板单元号	单元中每一组的条纹数	条纹宽度/μm	当平行光管 $f=550$ 时鉴别率角值/(″)	条纹宽度/μm	当平行光管 $f=550$ 时鉴别率角值/(″)
17	11	7.9	5.93	15.9	11.93
18	11	7.5	5.63	15.0	11.25
19	12	7.1	5.33	14.1	10.58
20	13	6.7	5.03	13.3	9.98
21	14	6.3	4.73	12.6	9.45
22	14	5.9	4.43	11.9	8.93
23	15	5.6	4.20	11.2	8.40
24	16	5.3	3.98	10.6	7.95
25	17	5.0	3.75	10.0	7.50

实验 4.6 用双棱镜测定光波波长

自从1802年英国科学家托马斯·杨(Thomas Young)用双缝做了光的干涉实验后，光的波动说开始为许多学者接受，但仍有不少反对意见.有人认为杨氏条纹不是干涉所致，而是双缝的边缘效应.二十多年后，法国科学家菲涅耳(Augustin J. Fresnel)做了几个新实验，令人信服地证明了光的干涉现象的存在，这些新实验之一就是他在1826年进行的双棱镜实验.它不借助光的衍射而形成分波前干涉，用毫米级的测量得到纳米级的精度，其物理思想、实验方法与测量技巧至今仍然值得我们学习.

【实验目的】

(1) 观察双棱镜产生的干涉现象，进一步理解产生干涉的条件.

(2) 熟悉干涉装置的光路调节技术，进一步掌握光具座上多元件的等高共轴调节方法.

(3) 学会用菲涅耳双棱镜测定光波波长.

【实验器材】

光具座、白光光源、单色光源(或干涉滤光片)、可调单狭缝、菲涅耳双棱镜、测微目镜、凸透镜、白屏.

【实验原理】

菲涅耳双棱镜由两个折射角很小(小于1°)的直角棱镜组成，且两个棱镜的底边连在一起(实际上是在一块玻璃上，将其上表面加工成两块楔形板而成)，用它可实现分波前干涉.通过对其产生的干涉条纹间距等长度量(毫米量级)的测量，可推算出光波波长.

如图4.6.1所示，双棱镜 AB 的棱脊(即两直角棱镜底边的交线)与狭缝S的长度方向平行，H为观察屏，且三者都与纸面垂直放置.由单色光源M发出的光，经透镜 L_1 会聚

于狭缝 S 上，由 S 出射的光束投射到双棱镜上，经折射后形成两束光，好像是从两虚光源 S_1 和 S_2 发出的．由于这两束光满足相干条件，故在两束光相互重叠的区域（图中画斜线的区域）内产生干涉，可在观察屏 H 上看到明暗交替的、与狭缝平行的、等间距的直线条纹．中心 O 处因两束光的光程差为零而形成中央亮纹，其余的各级条纹则分别排列在零级的两侧．

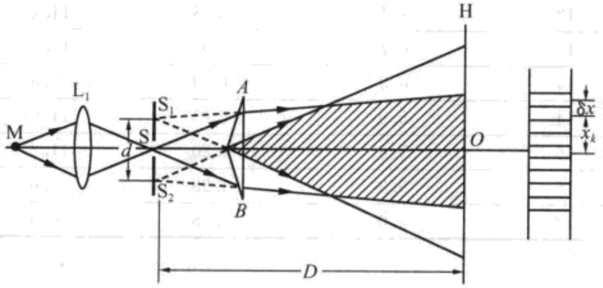


图 4.6.1

设两虚光源 S_1 和 S_2 间的距离为 d，虚光源平面中心到屏的中心之间的距离为 D，H 屏上第 k（k 为整数）级亮纹与中心 O 相距为 x_k，因为 $x_k<D$，$d\ll D$，故 x_k 由下式决定

$$x_k=\frac{D}{d}k\lambda$$

而暗纹的位置 x_k' 则由下式决定

$$x_k'=\frac{D}{d}\left(k+\frac{1}{2}\right)\lambda$$

任何两条相邻的亮纹（或暗纹）之间的距离为

$$\delta x=x_{k+1}-x_k=\frac{D\lambda}{d}$$

故

$$\lambda=\frac{d}{D}\delta x \tag{4.6.1}$$

上式表明，只要测出 d、D 和 δx，即可算出光波波长 λ．

本实验在光具座上进行．δx 的大小由测微目镜来测量；d、D 的值可用凸透镜二次成像法求得．

如图 4.6.2 所示，在双棱镜和观察屏（测微目镜的叉丝面）之间插入一焦距为 f_2 的凸

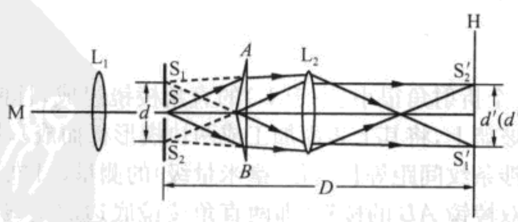


图 4.6.2

透镜 L_2，当 $D>4f_2$ 时，移动 L_2 使虚光源 S_1、S_2 两次成像于屏上，一次成放大实像 S_1'、S_1''，间距为 d'，一次为缩小实像 S_1''、S_2''，间距为 d''. 用测微目镜分别测出 d'、d''后用下式就可算出 d 值

$$d = \sqrt{d'd''} \tag{4.6.2}$$

若透镜 L_2 两次成像所移动的距离为 Δ，焦距为 f_2，则虚光源平面到屏之间的距离 D 为

$$D = 2f_2 + \sqrt{4f_2^2 + \Delta^2} \tag{4.6.3}$$

【实验内容】

1. 双棱镜干涉装置的共轴调节与干涉现象的观察

为了获得清晰的干涉条纹，保证有关物理量的测量精度，实验装置应调节到下述状态：

(1) 光具座上各元件等高共轴.

(2) 双棱镜的棱脊严格平行于狭缝，且狭缝宽度适当，以获得清晰的干涉条纹.

具体调节方法如下：

(1) 将白光源 M(白炽灯前已装有透镜 L_1)、狭缝 S、双棱镜 AB 如图 4.6.1 所示依次放置于光具座上. 用目测法粗调各元件中心等高，且使中心线平行于光具座，双棱镜的底面与中心线垂直.

(2) 点亮光源，使其均匀照亮狭缝. 调节双棱镜或狭缝，使由狭缝射出的光束能对称地照射在双棱镜棱脊的两侧.

(3) 在双棱镜的后面(并靠近双棱镜)放一白屏，从屏上光斑中可找到一条亮光带(此光带就是两相干光束的交叠区). 以测微目镜代替白屏，调节目镜的上下和左右位置，使光带进入目镜视场.

(4) 调出白光干涉条纹. 通过测微目镜观察，调节狭缝宽度，并微调狭缝的方位使其与双棱镜的棱脊平行直到出现清晰的彩色干涉条纹. 转动目镜读数鼓轮，使叉丝交点对准零级条纹，设此时目镜在光具座上的位置为Ⅰ.

(5) 沿光具座后移测微目镜(保证干涉条纹不移出目镜视场)，使之处于另一位置Ⅱ，调节双棱镜的左右位置，使零级条纹仍对准目镜叉丝交点；再使目镜移至位置Ⅰ，转动目镜读数鼓轮，用叉丝交点对准零级条纹……如此反复调节，直到测微目镜沿光具座前后移动时，零级条纹始终与叉丝交点对准.

(6) 在光源 M 后插入干涉滤光片，在双棱镜和测微目镜之间放置透镜 L_2(图 4.6.2)，并使 D 稍大于 $4f_2$，调节 L_2，使之与系统共轴. 此外，要求狭缝与双棱镜之间的距离既能满足两虚光源能经 L_2 成大像于测微目镜中，也能满足干涉条纹宽度适当.

至此，整个实验装置已调好，在以后的测量过程中，单缝、双棱镜和测微目镜的位置不再变动.

调节过程中应注意观察下列现象：

(1) 双棱镜的棱脊与狭缝平行和不平行时，干涉现象有何变化？

(2) 干涉条纹的宽度随哪些因素变化？

(3) 改变狭缝宽度，干涉条纹的可见度如何变化？

(4) 用白光光源或单色光源照明时，干涉现象有何不同？

记录以上观察结果，并予以解释.

2. 测定未知光波波长

(1) 测量 d、D. 在上述光路已调好的基础上，其他元件不动，只移动透镜 L_2 的轴向位置，使 L_2 在位置 x_1 成虚光源的放大像、位置 x_2 成虚光源的缩小像于测微目镜的叉丝平面，用测微目镜分别测出放大像间距 d' 和缩小像间距 d''，各测 5 次，取平均值. 并通过光具座导轨刻度尺读出 x_1、x_2，则 $\Delta=|x_1-x_2|$. 利用(4.6.2)式、(4.6.3)式计算 d 和 D.

(2) 测量 δx. 取下透镜 L_2，用测微目镜测出相隔较远的两条暗纹之间的距离，再除以所经过的条纹数目(比如说 10 条)，即得到相邻条纹的间距 δx. 重复测量 5 次，取其平均值. 以上测量数据录入表 4.6.1～4.6.3.

以上测量应注意测微目镜的正确使用，注意测微目镜叉丝的移动方向应与干涉条纹的取向及虚光源两光缝像的取向垂直，并沿一个方向转动测微目镜鼓轮，以避免引入螺距隙差.

(3) 将 δx、d、D 值代入(4.6.1)式，求出待测光波波长 λ.

【数据处理】

表 4.6.1 虚光源间距 d 数据表

单位/mm

测量序号	大像间距 $d'=\|x_2'-x_1'\|$			小像间距 $d''=\|x_2''+x_1''\|$			$d=\sqrt{d'd''}$
	读数 x_1'	读数 x_2'	d'	读数 x_1''	读数 x_2''	d''	
1							
2							
3							
4							
5							

$\bar{d}=$ ________ mm

表 4.6.2 虚光源至目镜分划板间距 D 数据表

$f_2=$ ________ mm

测量序号	成大像 L_2 位置读数 x_1/mm	成小像 L_2 位置读数 x_2/mm	$\Delta=\|x_2-x_1\|$/mm	D/mm
1				
2				
3				
4				
5				

$\bar{D}=$ ________ mm

表 4.6.3 条纹间距 δx 数据表

n=______

测量序号	第1个条纹位置读数 d_1/mm	第 $n+1$ 个条纹位置读数 d_2/mm	$n\delta x=\|d_2-d_1\|$/mm	δx/mm
1				
2				
3				
4				
5				

$\overline{\delta x}$=________mm

【预习思考】

(1) 双棱镜是怎样实现双光束干涉的?

(2) 是否在空间的任何位置都能观察到双棱镜产生的干涉条纹?如果不是,干涉条纹只存在哪个区域?

(3) 如果狭缝和双棱镜的棱脊并不平行,还能观察到干涉条纹吗?为什么?

(4) 双棱镜干涉装置的共轴调节中,为什么要用白光而不用单色光?

【习题】

(1) 干涉条纹的间距与哪些因素有关?当单缝和双棱镜的距离加大时,条纹的间距是变小还是变大?

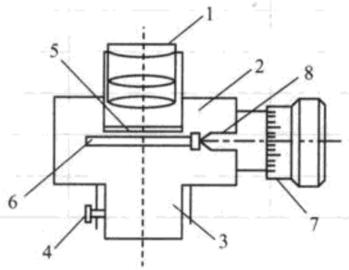
(2) 本实验对辅助透镜 L_2 的焦距大小有没有要求?为什么?

(3) 用本实验测光波波长,哪个量的测量误差对实验结果影响最大?应采取哪些措施来减小误差?

【附录】 测微目镜的结构及使用说明

测微目镜一般作为光学精密计量仪器的附件使用,如干涉显微镜、调焦望远镜、测微平行光管、各种测长仪等都装有这种目镜. 它也可以单独使用,直接测量非定域干涉条纹的宽度或由光学系统所成实像的大小等. 它的测量范围只有 0~8mm,但精度较高,其结构略图如图 4.6.3 所示. 带有目镜的镜筒与本体盒相连,而利用螺丝,则可将接头套筒与另一带有物镜的镜筒(图中未画出)相套接,以构成一台显微镜(如焦距仪的测量显微镜,见实验 4.2). 靠近目镜焦平面的内侧,固定了一块毫米刻度的玻璃标尺. 与该尺相距 0.1mm 处平行地放置一块分划板,分划板由玻璃片制成,其上刻有十字叉丝和竖直双线. 人眼贴近目镜筒观察时,即可在明视距离处看到玻璃尺上放大的刻线像及与其相叠的叉丝像(图 4.6.4). 因为分划板的框架与由读数鼓轮带动的丝杆通过弹簧(图中未画出)相连,故当读数鼓轮旋转时,丝杆就会推动分划板在导轨内左右移动,这时目镜中的竖直双线和十字叉丝将沿垂直于目镜光轴的平面横向移动. 读数鼓轮每转动一圈,竖线和十字叉

丝就移动 1mm；由于鼓轮上又细分 100 小格，因此每转过 1 小格，叉丝相应地移动 0.01mm. 测微目镜十字叉丝中心移动的距离，可从分划尺上的数值加上鼓轮上的读数而得到.



1.目镜；2.本体盒；3.接头套筒；4.螺丝；5.玻璃标尺；6.分划板；7.读数鼓轮；8.丝杆

图 4.6.3



图 4.6.4

使用测微目镜时应注意以下几点：

(1) 测量时先调节目镜与分划板的间距，看清楚十字叉丝.

(2) 调节整个目镜筒与被测实像的间距，使在视场中看到被测的像最清晰，并需仔细调节到被测像与叉丝像无视差，即两者处在同一平面上(判断无视差的方法参看实验 4.2). 只有无视差的调焦，才能保证测量精度.

(3) 松开测微目镜固定螺丝，旋转它，使其分划板移动方向与被测间隔方向一致，然后再固定好.

(4) 测量过程中，应缓慢转动鼓轮，且沿一个方向转动，中途不要反向. 因为丝杆与螺母的螺纹间有空隙，称为螺距差. 当反向旋转时，必须转过此间隙后分划板(叉丝)才能跟着螺旋移动. 因此若旋过了头，必须退回一圈，再从原方向旋转推进，重测.

(5) 要求叉丝中心不得移出刻度尺所示的刻度范围，如叉丝已达刻度尺一端，则不能再强行旋转测微鼓轮.

实验 4.7　等厚干涉的应用

薄膜干涉通常分为平行平面膜产生的等倾干涉(见实验 4.9)和非平行薄膜产生的等厚干涉. 本实验介绍的楔形薄膜和牛顿环是两种典型的等厚干涉现象. 利用等厚干涉现象可以测量光的波长，检验表面的平整度、球面度、光洁度，精确测量长度、角度，测量微小形变以及研究工件内应力的分布等.

【实验目的】

(1) 通过实验加深对等厚干涉原理的理解.

(2) 掌握用牛顿环测定透镜曲率半径和用楔形膜形成的干涉条纹测定微小直径(或微小厚度)的方法.

【实验器材】

读数显微镜、平凸透镜及平面玻璃板(或"牛顿环仪")、平面玻璃板(两块)、钠光灯.

4.7.1 用牛顿环测定透镜的曲率半径

【实验原理】

如图4.7.1所示，当平凸透镜的曲率很小的凸面与一平面玻璃板的光学面相接触时，二者间形成一空气薄层，其厚度由中心接触点向四周逐渐增加. 若以波长为 λ 的单色光垂直入射，入射光将在空气膜的上、下两表面反射，产生具有一定光程差的两束相干光，从而在薄膜表面附近产生等厚干涉条纹. 从反射光方向观察，该等厚条纹是一组以接触点为中心的亮暗交替的同心圆环，且中心是一暗斑. 此干涉图样称为牛顿环. 在实验应用中，常用它来测量透镜的曲率半径，若已知透镜的曲率半径，也可用来测定光波波长.

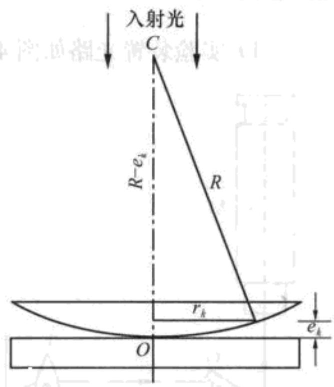


图4.7.1

设离接触点 O 任一距离为 r_k 处的空气膜厚为 e_k，则在该处空气膜上、下表面反射光所产生的光程差为

$$\Delta = 2e_k + \frac{\lambda}{2} \tag{4.7.1}$$

式中，$\lambda/2$ 的附加光程差是因为光从平面玻璃板上反射时相位有180°的变化.

令 R 为透镜凸面的曲率半径，由如图4.7.1所示的几何关系可得

$$R^2 = (R - e_k)^2 + r_k^2 = R^2 - 2Re_k + e_k^2 + r_k^2$$

因 $R \gg e_k$，故 e_k^2 可忽略，得

$$e_k = \frac{r_k^2}{2R} \tag{4.7.2}$$

第 k 级暗环的形成决定于

$$\Delta = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \quad (k = 0,1,2,\cdots) \tag{4.7.3}$$

由(4.7.1)式、(4.7.2)式和(4.7.3)式可得

$$r_k^2 = kR\lambda \tag{4.7.4}$$

若已知 λ，只要由实验测量出第 k 级干涉暗环的半径 r_k，就可由(4.7.4)式算出待测球面的曲率半径 R. 但由于平凸透镜和平面玻璃板的接触处附有尘埃或接触时受力产生了形变，故接触处不可能是一个几何点，而是一个圆斑，以致难以判定干涉环的中心和级次，因此要利用(4.7.4)式来测定 R 实际上是不可能的. 在实际测量中，常常将(4.7.4)式变为

$$R=\frac{d_{k+m}^2-d_k^2}{4m\lambda} \tag{4.7.5}$$

式中，d_{k+m}和d_k分别为第$(k+m)$级和第k级暗环的直径. 由(4.7.5)式可知，只要数出所测各环的环序差m，而无需确定各环的级数. 此外，为了减小测量误差，应选取距中心较远的、比较清晰的两个环来测量，且使m值取大些. 这样将成倍地减小读数显微镜的测量叉丝与干涉条纹对准时产生的定位误差，提高测量的精度.

【实验内容】

(1) 实验装置光路如图 4.7.2 所示. 将平面玻璃板和平凸透镜按图中所示放置在读数显微镜的载物台上，让钠光 S 经会聚透镜 L 变成平行光(亦可直接使用扩展光源)入射到玻璃片 G 上，使一部分光由 G 反射后垂直入射到平凸透镜上. 调节 G 的高低及方位(约与水平方向成 45°角)和钠灯的位置，使显微镜视场中亮度大而均匀.

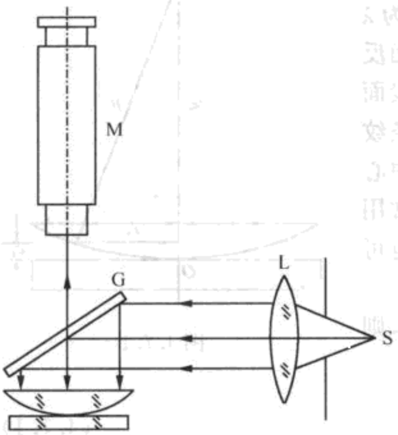


图 4.7.2

(2) 调节读数显微镜 M 的目镜，使目镜视场中十字叉丝最清晰，然后上、下移动镜筒对空气膜的上表面调焦，找到清晰的干涉圆环.

(3) 测量前还应调节读数显微镜十字叉丝竖线与显微镜筒的移动方向垂直(亦即十字叉丝横线与显微镜的主尺方向平行，如何调节，请读者思考).

(4) 调节显微镜筒至主尺中心，并调节牛顿环仪位置，使叉丝交点与干涉圆环的中心重合，然后使叉丝的交点由中心向右移到约 30 个干涉圆环，再反转越过中心向左移到约 30 个干涉圆环，观察整个视场中干涉条纹的清晰度，以保证测量范围内干涉圆环都清晰.

(5) 测量. 取$m=10$，并选相继 5 组直径平方差$(d_{k+m}^2-d_k^2)$，然后求其平均值. 具体方法是：如选择的测量范围为距中心的第 11 个暗环到第 25 个暗环时，则转动显微镜的测微螺旋，使镜筒向左(或向右)移动到叉丝交点对准第 30 环，再反转使叉丝竖线依次与第 25、24…21 及第 15、14…至第 11 个暗环相切，并逐次记下相应的读数x_{25}、x_{24}…x_{21}，x_{15}、x_{14}…x_{11}；再将镜筒继续按原方向移动，使叉丝竖线越过中心暗斑，与另一方的第 11、12…15 及 21、22…至第 25 个暗环相切，记下相应的读数x'_{11}、x'_{12}…x'_{15}，x'_{21}、x'_{22}…x'_{25}，填入表 4.7.1. 再将同一暗环的两次读数相减算出各环的直径d_{11}、d_{12}、d_{13}、d_{14}、d_{15}及d_{21}、d_{22}、d_{23}、d_{24}、d_{25}. 测量时要注意干涉环的序数不能数错.

(6) 用逐差法处理数据. 用逐差法可求得 5 个$(d_{k+10}^2-d_k^2)$的值，即$d_{25}^2-d_{15}^2$、$d_{24}^2-d_{14}^2$、…、$d_{21}^2-d_{11}^2$. 取它们的平均值，利用(4.7.5)式计算透镜凸面的曲率半径.

(7) 计算测量结果R并估算不确定度U_R. 估算时把波长λ和$m=10$看作常数，仪器误差可取读数显微镜的示值误差限，即$\Delta_{仪}=0.01\text{mm}$.

表 4.7.1 数据表 牛顿环编号：________

环序 k	显微镜读数/mm		直径 d_k/mm	d_k^2/mm^2	$d_{k+m}^2-d_k^2/\text{mm}^2$
	x_k	x_k'	x_k-x_k'		
25					
24					
23					
22					
21					
15					
14					
13					
12					
11					

4.7.2 用楔形膜(劈尖)形成的干涉条纹测量细丝的直径

【实验原理】

楔形膜形成的干涉条纹实验，可直接用于测量细丝的直径，也可用来测量诸如纸、云母片等的厚度.

如图 4.7.3 所示，将待测细丝或薄片放在两块平行平面玻璃板的一端，则在两板间形成一劈尖形空气薄层. 由于劈尖上下表面均为平面，所以干涉图样为一组等间距的直线状等厚干涉条纹，且条纹平行于两板另一端的交线.

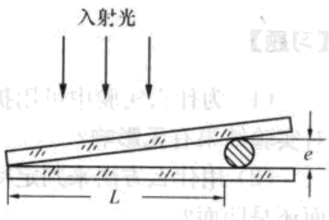


图 4.7.3

设单色光的波长为 λ，细丝直径为 e，则由(4.7.1)式和(4.7.3)式可得

$$e = k\cdot\frac{\lambda}{2}\quad (k=0,1,2\cdots)\tag{4.7.6}$$

式中，k 为空气膜厚为 e 处所对应的干涉条纹级数.

一般说来 k 值较大，且干涉条纹细密，直接数出干涉条纹数 k 难免出现差错，因此可先测出 n(如 n 为 30)个干涉条纹的距离 l，得出单位长度内的干涉条纹数 $n_0=n/l$，再测出细丝与两玻璃板接触端的距离 L，则总的干涉条纹数 $k=n_0L$，代入(4.7.6)式得细丝直径为

$$e = n_0L\cdot\frac{\lambda}{2}\tag{4.7.7}$$

【实验内容】

(1) 如图 4.7.4 所示，将待测细丝夹在两块玻璃板的一端，然后置于读数显微镜载物

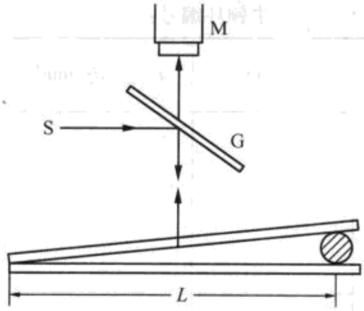


图 4.7.4

台上，使显微镜对劈尖表面调焦，以看到清晰的干涉条纹.

(2) 调节显微镜十字叉丝竖线与显微镜主尺方向垂直. 为了测量准确，还应使细丝与干涉条纹平行. 然后，调整劈尖的位置，使干涉条纹与十字叉丝竖线平行.

(3) 测量.

① 若总的条纹数目不太多(100 条左右)，可直接数出总的条纹数 k，利用(4.7.6)式计算细丝的直径 $e(\lambda=589.3\text{nm})$.

② 若 k 值较大，则先测出单位长度内的干涉条纹数 n_0 和细丝至两玻璃板接触端的距离 L，由(4.7.7)式求出细丝直径 e，分别测量 5 次取平均值.

【预习思考】

(1) 本实验所观察到的是等厚干涉条纹还是等倾干涉条纹？你能从观察中加以区别吗？

(2) 牛顿环是定域条纹还是非定域条纹？你有什么办法大体确定其定域位置？

(3) 从牛顿环透射过来的光能不能形成干涉圆环？如果有圆环，则与反射光形成的干涉圆环有何不同？

(4) 若劈尖的夹角为 θ，则当 θ 减少时，干涉条纹有何变化？

【习题】

(1) 为什么实验中可用扩展光源代替平行光？这与等厚干涉产生的条件有无矛盾？对实验结果有无影响？

(2) 用什么方法来判定待测面是平面还是球面？若是球面，又如何判定该球面是凸面还是凹面？

(3) 用牛顿环测球面的曲率半径时：

① 能否先测得某一干涉圆环的直径 d_k 后用公式 $d_k^2=4kR\lambda$ 计算 R 值？为什么？

② 能否用测量弦长来代替直径的测量？试作图说明.

(4) 如果被测透镜是平凹透镜，能否用本实验的方法测定其凹面的曲率半径？试说明理由并推导出相应的公式.

(5) 分析本实验中主要系统误差来源.

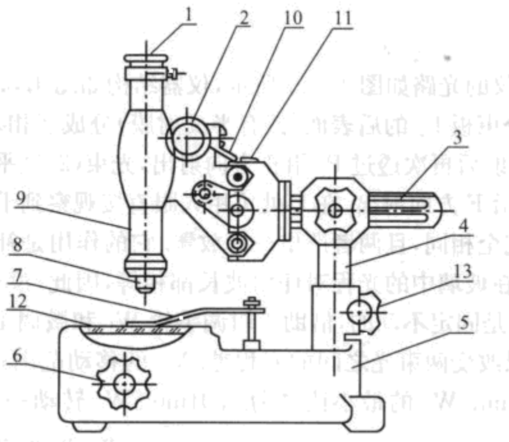
(6) 试利用本实验装置设计一个测定水的折射率的实验.

【附录】 读数显微镜的结构及使用说明

它是用于精密测量长度的专用显微镜，由显微镜管、读数移动装置和光源反射镜组成. 它的测量范围为 0～50mm 或 0～180mm，精度为 0.01mm，通常具有几十倍的放大率，工作距离也比较大，因此读数显微镜的应用比测微目镜更广泛.

读数显微镜的型号较多，实验室目前常用的有两种类型：一种是显微镜管固定不动，通过载物平台的精密移动来进行测量（如"无锡"产的测量显微镜），此类显微镜的镜管不能水平放置，其用途受到一定限制；另一种是载物台固定不动，而是通过显微镜管的精密移动来进行测量，并且显微镜管既可竖直放置又可水平放置，应用范围更广（如JXD型、JCD2型读数显微镜等）.

JXD型读数显微镜的外形结构如图4.7.5所示. 它由螺旋测微装置和显微镜两部分组成. 测量前，将被测物体放在毛玻璃上，要求被测物表面与镜筒的光轴垂直. 测量时，先放松底座手轮，粗调工作距离（约41.9mm），再用调焦手轮进行微调，使像清晰. 调节目镜，清楚地看见视场中的十字叉丝后，转动读数鼓轮，使显微镜中十字叉丝交点对准被测量线条的一端，即可在标尺和读数鼓轮上读数. 读数标尺上有0～50mm刻度线，每格为1mm；鼓轮每旋转一圈，指标10的指示值就改变一格（1mm）；鼓轮的圆角等分为100小格，每小格代表0.01mm. 所以，读数时毫米以上部分由标尺读出，毫米以下部分由鼓轮读出. 再旋转鼓轮使镜筒移动，让十字叉丝交点对准被测线条的另一端，又可进行第二次读数. 两次读数之差即为被测物体直线长度.



1.目镜；2.调焦手轮；3.横轴；4.立柱；5.底座；6.反光镜调节手轮；7.工作台压簧；8.物镜；9.镜筒；10.指标；11.标尺；12.毛玻璃；13.底座手轮

图4.7.5

由于显微镜管（或载物台）的移动均靠测微螺旋丝杆的推动，因此，读数显微镜和测微目镜一样也要**防止螺距差**（采用单方向测量）. 测量时还必须调节，**使显微镜**（或载物台）**的移动方向与被测量的方向一致.**

实验4.8　迈克耳孙干涉仪

迈克耳孙干涉仪是利用分振幅法产生双光束而实现干涉的仪器，其主要特点是两相干光束分得很开，且它们的光程差可通过移动一个反射镜或在一光路中加入一种介质来方便地改变，利用它可以测量光波波长、微小长度及其变化等. 现在，根据迈克耳孙干涉仪

原理研制的各种精密仪器已被广泛用于长度计量和光学平面质量检测等领域.

本实验包含极为丰富的物理内涵,实验操作技巧又无一不与实验原理紧密相连,因此实验时必须手脑并用,仔细观察每一实验现象,判断每一细微的调节对干涉现象带来的影响,对所观察到的现象仔细分析以指导实验操作.

【实验目的】

(1) 了解迈克耳孙干涉仪原理及其结构.

(2) 掌握迈克耳孙干涉仪的调节方法,调出定域和非定域等各种干涉条纹.

(3) 结合实验对各种干涉的形成条件、图样特点、变化规律它们之间的区别进行分析,加深对干涉现象的理解.

(4) 测量钠光D双线的波长差或He-Ne激光的波长.

【实验器材】

迈克耳孙干涉仪、钠光灯、He-Ne激光器、白炽灯、扩束透镜、毛玻璃.

【仪器介绍】

迈克耳孙干涉仪的光路如图4.8.1所示,仪器结构如图4.8.2所示.从准单色扩展光源S发出的光,被分束板P_1的后表面(镀有半反射膜)分成互相垂直的两束光,其中光束(1)经平面镜M_1反射后再次透过P_1沿正方向射出,光束(2)经平面镜M_2反射后再由P_1的半反射面反射也沿E方向射出.在E处可用人眼直接观察到干涉条纹.P_2为补偿板,其材料和厚度与P_1完全相同,且两者严格平行放置.它的作用是补偿光束(2)的光程,以保证(1)和(2)两束光在玻璃中的光程对任何波长都相等,因此,没有P_2是得不到白光干涉条纹的.平面镜M_2是固定不动的,借助于粗调手轮W_1和微调手轮W_2,可使M_1在精密导轨上前后移动,以改变两束光之间的光程差.M_1的移动范围在100mm左右,W_1转动一周,M_1可移动1mm,W_1的最小读数为0.01mm.W_2转动一周,M_1可移动0.01mm,

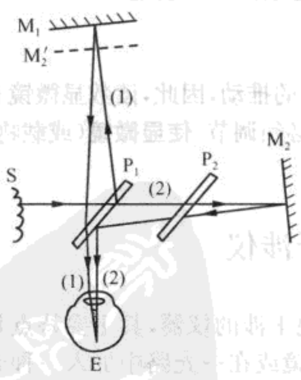


图 4.8.1

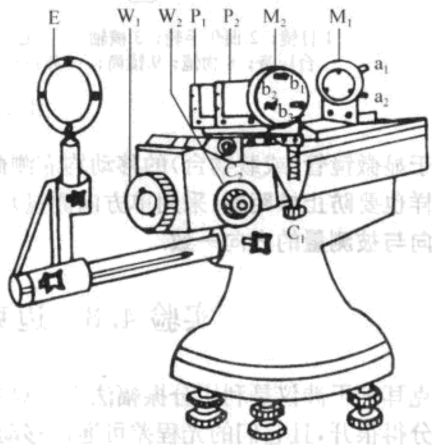


图 4.8.2

W_2 的最小读数为 1×10^{-4}mm. 平面镜 M_1 和 M_2 的背后各有三个螺钉(图 4.8.2 中的 a_1、a_2、a_3 和 b_1、b_2、b_3),用来调节它们的方位. M_2 镜下端的两个微调螺钉 C_1 和 C_2,用来精确调节 M_2 的方位.

使用粗调手轮 W_1 和微调手轮 W_2 时,要注意:转动 W_1 前,需先将手柄 V(在仪器左侧,图中未画出)顺时针转到"开"的位置. 粗调后,需要使用 W_2,必须逆时针方向一边缓慢地转动手柄 V 至"合"的位置,一边较快地转动 W_2,使机件平稳啮合后(此时 W_2 的刻度圈复位到与标有刻度指示线的圆盘同轴)方可使用. 此时不得再转动 W_1,否则会造成仪器损坏. W_1、W_2 换挡时宜同方向转动.

仪器的光学部件均显露在外部,要倍加爱护,不得用手触摸或擦拭任何光学表面,并要防尘、防震,调节时动作要缓慢.

4.8.1 定域干涉现象的观察和钠光 D 双线波长差的测定

【实验原理】

在图 4.8.1 中,M_2'是 M_2 被 P_1 半反射面反射形成的虚像. 这样,光从 M_1 和 M_2 的反射相当于从 M_1 和 M_2'的反射,所以迈克耳孙干涉仪所产生的干涉与由 M_1、M_2'所构成的空气薄膜所产生的干涉是等效的.

1. 等倾干涉

用波长为 λ 的扩展光源照明迈克耳孙干涉仪,当 M_1 与 M_2 彼此严格垂直时,M_1 与 M_2'互相平行,如图 4.8.3 所示. 对于倾角 i 相同的各光束,从 M_1 和 M_2'两面反射回来的光线所产生的光程差为

$$\Delta = 2e\cos i \qquad (4.8.1)$$

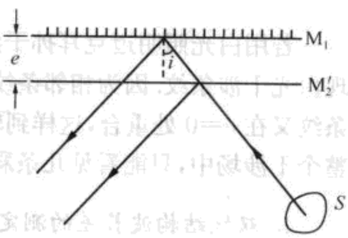


图 4.8.3

式中,e 为 M_1 和 M_2'间空气膜的厚度. 此时在 E 处人眼直接观察(或用凸透镜成像于其焦平面上),可以看到一组明暗相间的同心圆环,即等倾干涉条纹. 第 k 级和第 $k+1$ 级亮条纹满足公式

$$2e\cos i_k = k\lambda \qquad (4.8.2)$$

$$2e\cos i_{k+1} = (k+1)\lambda \qquad (4.8.3)$$

两式当 i_k 较小时,可计算相邻两条纹的角距离 Δi_k 为

$$\Delta i_k = i_{k+1} - i_k \approx -\frac{\lambda}{2ei_k} \qquad (4.8.4)$$

由此可得出干涉条纹的特点是:

(1) 比较(4.8.2)式和(4.8.3)式,可知 $i_{k+1}<i_k$,即第$(k+1)$级的干涉条纹在第 k 级干涉条纹的内侧,愈靠近中心,干涉条纹的级次愈高. 在中心处,$i=0$,$\Delta=2e$ 最大,所以干涉级次最高,若中心处恰为第 k 级亮纹,则

$$2e = k\lambda, \quad k = \frac{2e}{\lambda} \tag{4.8.5}$$

当移动 M_1 镜使 e 增大时，干涉圆环中心级次就越来越高，于是可观察到干涉圆环逐个地从中心冒出来. 反之，当 e 减小时，干涉圆环逐个地向中心缩进去. 每当冒出或缩进一个条纹时，e 就增加或减少 $\lambda/2$ 的距离. 由此可以精密地测量长度或光波波长.

(2) (4.8.4)式表明，i_k 一定时，e 越大 Δi_k 越小，即条纹将随着 e 的增大而越来越密. e 足够大后，观察者就分辨不清这些干涉条纹了，所以在观察和测量时，使 e 小些，即 M_1 和 M_2 与 P_1 的距离相差不大为好. 此外，当 e 一定时，i_k 越大，Δi_k 就越小，所以干涉圆环中心疏，边缘密.

2. 等厚干涉

如果 M_1 和 M_2' 靠得很近，且相互间有一个很小的楔角，则可观察到等厚干涉条纹，条纹定域在空气楔表面或其附近(图 4.8.4)，条纹形状是一组平行于 M_1 与 M_2' 交线的直条纹. 若移动 M_1 镜，使 e 增大，干涉条纹将变成弧形. 因这时 e 较大，$\cos i$ 的影响不能忽略，i 增大，$\cos i$ 的值就减小，由 $2e\cos i_k = k\lambda$ 可知，要保持相同的光程差，e 必须增大. 所以干涉条纹在 i 逐渐增大的地方要向 e 增大的方向移动，使得干涉条纹逐渐变成弧形，而且条纹弯曲的方向是凸向 M_1 与 M_2' 的交线.

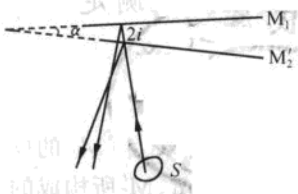


图 4.8.4

3. 白光干涉条纹

若用白光照明迈克耳孙干涉仪，则只能在光程差接近零(即 M_1 与 M_2' 的交线处)时出现白光干涉条纹. 因为相邻条纹的间隔 Δi_k 正比于波长((4.8.4)式)，且所有波长的中央条纹又在 $e=0$ 处重合，这样到较高级次的区域，不同波长的干涉条纹就互相重叠，因而在整个干涉场中，只能看见几条彩色条纹.

4. 双线结构波长差的测定

若入射光为理想的单色光，则移动 M_1 镜时，视场中的干涉条纹总是清晰可见的，可见度最大. 但实际上任何谱线都有一定的线宽，许多看来单色的谱线也是由波长十分接近的双线或多重线组成的. 理论上已经证明：单色线宽使条纹可见度随光程差变化单调下降，双线结构使条纹可见度随光程差作周期性变化.

设光源中含有两个相近的波长 λ_1 和 λ_2(如钠光)，当 M_1 与 M_2' 相距为 e_1 时，在条纹视场中心，如果波长为 λ_1 的光形成的第 k_1 级亮纹恰好与波长为 λ_2 的光形成的第(k_1+n)级暗纹重合，即

$$2e_1 = k_1\lambda_1 = \left(k_1 + n + \frac{1}{2}\right)\lambda_2$$

则此时条纹的可见度为零(若 λ_1、λ_2 的光强不相等，则可见度最小但不为零)，视场中心被均匀照明.

按原方向移动 M_1 镜至相邻的下一个可见度为零的位置,设此时 M_1 与 M_2'相距为 e_2,则有

$$2e_2 = k_2\lambda_1 = \left(k_2 + n + 1 + \frac{1}{2}\right)\lambda_2$$

令 $\lambda_1 \cdot \lambda_2 \approx \bar{\lambda}^2$,$\Delta e = e_2 - e_1$,$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$,解以上两方程得

$$\Delta\lambda \approx \frac{\bar{\lambda}^2}{2\Delta e} \tag{4.8.6}$$

式中,$\bar{\lambda}$ 为 λ_1 和 λ_2 的平均值,Δe 为视场中心相继两次出现可见度为零时 M_1 镜移动的距离,其值可从测微鼓轮上读出,利用(4.8.6)式即可计算双线的波长差.

【实验内容】

1. 观察等倾干涉现象和测定钠光双线的波长差

1) 等倾干涉条纹的调节与观察

借助于镜面成像的规律,调节 M_1、M_2 镜的方位,使 M_1 和 M_2'平行,即可得到等倾干涉条纹.

移动 M_1 镜,使 M_1、M_2 距 P_1 大致相等,将 M_2 下端的两个微动螺钉 C_1、C_2 旋转到中间位置,以便往两端都有调节余地. 再缓慢调节 M_1 镜和 M_2 镜后面支架上的螺钉,使三个小螺钉受力均匀,不要过紧或过松.

以钠光灯做光源,在灯罩通光孔上插入画有十字的毛玻璃,以便形成均匀扩展光源照明迈克耳孙干涉仪. 用眼睛在 E 处向 M_1 镜看去,将观察到由 M_1 和 M_2 反射回的十字像(两对像或三个像,由仪器本身决定). 仔细调节 M_1 和 M_2 后面支架上的螺钉,直到各十字像对应重合为两个像为止. 当十字像确实重合时,就可看见干涉条纹. 然后微调 M_1 或 M_2 中的一个,使干涉条纹变宽,直到干涉条纹变成同心圆. 最后调节 M_2 镜下端的微调螺钉 C_1、C_2,使 M_2'与 M_1 严格平行,得到等倾干涉条纹,此时如果眼睛上下、左右微微移动,干涉圆环的大小不应发生变化,仅圆心位置随视线平移而已. 若眼睛上下移动时干涉圆环大小随之变化,则应调节垂直螺钉 C_1,若眼睛左右移动时干涉圆环大小随之变化,则应调节水平螺钉 C_2.

转动粗调手轮 W_1,使 M_1 镜缓慢移动,观察等倾条纹的变化,从圆环的冒出或缩进,判断 M_1 与 M_2'之间的距离 e 是变大还是变小,并观察条纹的粗细、疏密和 e 及 i 的关系,记录观察结果.

2) 测量钠光双线的波长差($\bar{\lambda}$=589.3nm)

测量前,应缓慢移动 M_1 镜,仔细观察视场中心条纹可见度的变化规律,正确判断当视场中心条纹模糊到什么样的程度才算可见度最小(因双线的光强不相等,所以最小可见度不为零).

测量时,转动微调手轮 W_2 缓慢移动 M_1 镜,使视场中心条纹可见度最小,记下 M_1 镜的位置 e_1,再沿原方向移动 M_1 镜,直到可见度又最小,记下 M_1 镜的位置 e_2,即得 $\Delta e = |e_1 - e_2|$. 为了减少测量误差,可沿同一方向连续测量 6 个可见度最小时 M_1 的位置 e_1、e_2、e_3、e_4、e_5、e_6,再用逐差法处理数据,求 Δe 的平均值,利用(4.8.6)式计算钠光双线的波

长差 $\Delta\lambda$.

2. 观察等厚干涉现象

(1) 以钠光灯为光源,调出等厚干涉条纹. 移动 M_1 镜,使得等倾条纹逐个向中心缩进,条纹变粗变疏. 当视场中只出现 1～2 个圆环时,再调节 M_2 镜的微动螺钉,使 M_1 与 M_2'之间有很小的夹角,即可观察到等厚干涉条纹. 若条纹弯曲,可缓慢移动 M_1 镜,使弯曲条纹往圆心方向移动,最后观察到平行的直线条纹.

M_1 镜不动,改变 M_1 与 M_2'之间的夹角,观察干涉条纹的变化情况;将干涉条纹的间距调至 2～3mm,移动 M_1 镜,观察干涉条纹从弯曲变直再变弯曲的现象以及条纹可见度的变化规律. 记录观察结果,并予以分析.

(2) 调出白光干涉条纹. 移动 M_1 镜,当视场中的干涉条纹由弯将要变直时,换用白光源(将钠光源稍向旁边移动,使视场中仍看见少数几条钠光干涉条纹),使 M_1 继续按原方向非常缓慢地移动(可看到钠光条纹一条条地移出视场),直到视场中出现彩色条纹. 彩色条纹的对称中心就是 M_1 和 M_2'的交线,即此时干涉仪的两束光的光程相等. 记录条纹的色彩、形状及 M_1 镜的位置 e_0.

注意:由于白光干涉条纹数很少,所以调节白光干涉条纹的要点是 M_1 镜的移动速度要缓慢(如上所说用钠光条纹进行监视,可很容易调出);否则白光条纹一晃而过而不易找到.

4.8.2　非定域干涉现象的观察和 He-Ne 激光波长的测定

【实验原理】

如图 4.8.5 所示,经短焦距透镜 L 会聚后的激光束,可以认为是一个很好的点光源 S 发出的光,S 发出的球面光波照明迈克耳孙干涉仪,经 P_1 分束及 M_1、M_2 反射后射向接收屏 E 的光,可以看成是由虚光源 S_1、S_2 发出的,其中 S_1 为 S 经 P_1 的半反射面及 M_1 反射所成的像,S_2 为经 M_2 及 P_1 的半反射面反射后所成的像(等效于 S 经 P_1 及M_2'反射后成的像). 显然 S_1、S_2 是一对相干点光源,它们发出的球面波在其相遇的空间里处处相干,即在这个空间里各处都能产生干涉条纹,故这种干涉现象称为非定域干涉. 观察屏 E 上任一点 E'的光强取决于 S_1 和 S_2 至该点的光程差,由于光程差相同点的光强相同,故干涉条纹是一组旋转双曲面与观察屏相交所形成的曲线,其旋转轴就是 S_1 和 S_2 的连线. 当 E 与 S_1、S_2 连线垂直时,即能得到圆条纹,圆心为 S_1、S_2 连线与屏的交点 E_0,E_0 处的光程差 $\Delta=2e$. 可以证明当 $Z\gg E_0E'$时,屏上任意点的光程差仍为

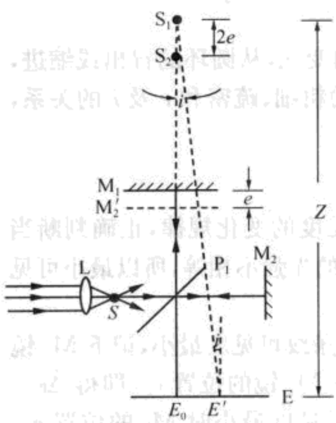


图 4.8.5

$$\Delta = 2e\cos i \tag{4.8.7}$$

上式与定域情形的(4.8.1)式相同,当 M_1 与 M_2'之间距离 e 连续改变时,同样可以看到圆心处有条纹向外冒出(或缩进),每改变一个条纹时,e 就改变 $\lambda/2$ 的距离,由此可测量激光的波长.若 M_1 与 M_2'不平行,即 S_1 或 S_2 不在屏 E 的法线上,在屏 E 上将会观察到一组弧形条纹.

【实验内容】

1. 观察非定域干涉现象

(1) 调出干涉圆环.点亮激光源,使激光束以与分束板 P_1 成 45°角直接射向分束板 P_1.在 E 处放一毛玻璃屏,此时屏上呈现两组分立的光斑,调节 M_1 和 M_2 背后支架上的小螺钉,使两组光斑对应重合,然后在光源与分束板 P_1 之间共轴地放一短焦距凸透镜,屏上即可呈现出干涉条纹,微调 M_2 镜,使条纹成为清晰的同心圆环.

(2) 前后移动 M_1 镜,使 e 增加或减小,观察干涉圆环的变化规律(与定域干涉等倾条纹的观察要求相同),记录观察结果.

(3) 将毛玻璃屏前后移动,观察条纹的变化情况.若将另一毛玻璃放在透镜前面形成扩展光源,此时在屏上是否还能接收到干涉条纹?

(4) 如何设法观察到非定域椭圆、直线及双曲线条纹?

2. 测量 He-Ne 激光波长

调出圆条纹后,沿一个方向移动 M_1 镜,记下 M_1 的初始位置 e_1,并对于涉条纹的冒出(或缩进)进行计数,当 $\Delta k=200$ 时,停止移动 M_1 镜,再记下 M_1 的位置 e_2,于是 $\Delta e=|e_1-e_2|$,重复测量 5 次,利用公式 $\lambda=2\Delta e/\Delta k$,求出激光波长.

注意:①**不要正对激光束观察,以免损伤眼睛!** ②测量时,要避免引入螺距隙差.

【预习思考】

(1) 定域干涉与非定域干涉的形成条件是什么?

(2) 迈克耳孙干涉仪的圆形干涉条纹的疏密有何规律?

(3) 是否所有的圆形条纹都是等倾干涉条纹?举例说明之.

(4) 为什么没有补偿板 P_2 得不到白光干涉条纹?

【习题】

(1) 调节扩展光源(钠光)的定域干涉条纹时:①为什么先要使 M_1 和 M_2 距 P_1 大致相等?②毛玻璃十字线的多个像是如何形成的?③若经调节已使十字像重合,但仍无干涉条纹出现,其可能原因是什么?应采取怎样的调节措施?

(2) 怎样判断 M_1 与 M_2'重合,M_1 处于 M_2'之前(M_2'与 P_1 之间)还是其后?

(3) 怎样验证扩展光源产生的等倾干涉条纹定域在无穷远处以及等厚条纹定域在镜面附近?

(4) 根据图 4.8.5，试证明非定域干涉时两相干光源 S_1、S_2 在观察屏 E 上任一点的光程差为 $\Delta=2e\cos i$.

(5) 若用汞灯代替白炽灯调出彩色条纹，试比较两种彩色条纹的区别，并解释之.

实验 4.9　单缝衍射的光强分布及缝宽测定

【实验目的】

(1) 观察单缝的夫琅禾费衍射现象及其随单缝宽度变化的规律，加深对光的衍射理论的理解.

(2) 学习光强分布的光电测量方法.

(3) 利用衍射花样测定单缝的宽度.

【实验器材】

光具座、He-Ne 激光器、可调单狭缝(或固定单缝)、光电池及测距支架、光点检流计、投影仪(或读数显微镜)

【实验原理】

夫琅禾费衍射是平行光的衍射，即要求光源及接收屏到衍射屏的距离都是无限远(或相当于无限远). 在实验中，它可借助两个凸透镜来实现. 如图 4.9.1 所示，位于透镜 L_1 的前焦面上的单色狭缝光源 S，经透镜 L_1 后变成平行光，垂直照射在单缝 D 上，通过单维 D 衍射后在透镜 L_2 的后焦面上呈现出单缝的衍射花样，它是一组平行于狭缝的明暗相间的条纹. 与光轴平行的衍射光束会聚于屏上 P_0 处，是中央亮纹的中心，其光强设为 I_0，与光轴成 θ 角的衍射光束则会聚于 P_θ 处，可以证明

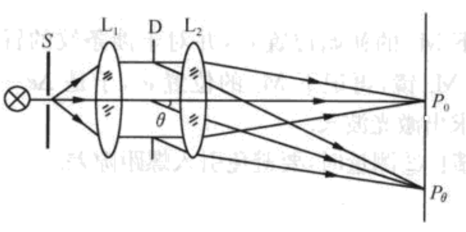


图 4.9.1

$$I_\theta = I_0 \frac{\sin^2 u}{u^2},\quad u = \frac{\pi a \sin\theta}{\lambda} \tag{4.9.1}$$

式中，a 为狭缝宽度，λ 为单色光的波长. 由(4.9.1)式得到：

(1) 当 $u=0$(即 $\theta=0$)时，$I_\theta=I_0$，衍射光强有最大值. 此光强对应于屏上 P_0 点，称为主极大. I_0 的大小决定于光源的亮度，并和缝宽 a 的平方成正比.

(2) 当 $u=k\pi(k=\pm1,\pm2,\pm3,\cdots)$，即 $a\sin\theta=k\lambda$ 时，$I_\theta=0$，衍射光强有极小值，对应于屏上暗纹. 由于 θ 值实际上很小，因此可近似地认为暗条纹所对应的衍射角为 $\theta\approx k\lambda/a$. 显然，主极大两侧暗纹之间的角宽度 $\Delta\theta=2\lambda/a$，而其他相邻暗纹之间的角宽度 $\Delta\theta=\lambda/a$，即中央亮纹的宽度为其他亮纹宽度的两倍.

(3) 除中央主极大外，两相邻暗纹之间都有一个次极大，由(4.9.1)式可以求得这些

次极大的位置出现在 $\sin\theta=\pm1.43\dfrac{\lambda}{a},\pm2.46\dfrac{\lambda}{a},\pm3.47\dfrac{\lambda}{a},\pm4.48\dfrac{\lambda}{a}\cdots$处；其相对光强依次为$\dfrac{I_\theta}{I_0}=0.047,0.017,0.008,0.005\cdots$. 夫琅禾费单缝衍射光强分布曲线如图 4.9.2 所示.

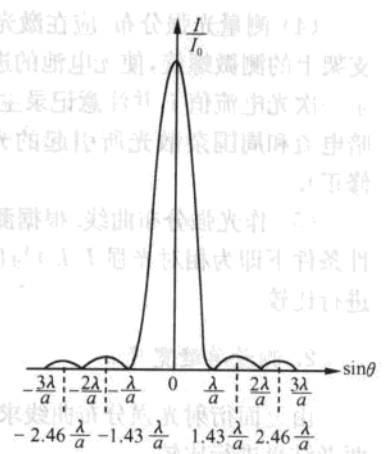
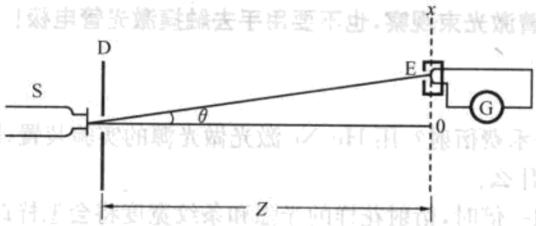


图 4.9.2

【实验内容】

本实验使用 He-Ne 激光作光源，因为 He-Ne 激光束具有良好的方向性(远场发散角为 1 毫弧度左右)，光束细锐，能量集中，加之一般衍射狭缝宽度 a 很小，故准直透镜 L_1 可省略不用；如果将观察屏放置在距离单缝较远处，即 Z 远大于 a，故聚焦透镜 L_2 也可省略. 实验中，使屏到单缝之间的距离 Z 为 1.5m 左右，单缝的宽度 a 为 0.1～0.3mm. 实验装置如图 4.9.3 所示.



S.He-Ne激光器 D.可调狭缝 E.光电池 G.光点检流计

图 4.9.3

1. 测量夫琅禾费单缝衍射光强分布

(1) 按图 4.9.3 在光具座上依次放置激光管 S、单缝 D 和光电池 E. 光电池(带有进光小孔)装在一个横向测距的支架上，可以沿水平方向(x 方向)移动，即相当于改变衍射角 θ，并使单缝到光电池的距离 Z 为 1.5m 左右.

(2) 开启激光电源，调节其工作电流在 5mA 左右，使激光束垂直照射在单缝上，可先用纸屏在光电池处观察衍射图样. 调节狭缝成竖直状态，使衍射图样平行于 x 方向展开，以保证光电池横向移动时，进光小孔不离开衍射花样. 调节狭缝宽度和测距支架的位置，使光电池至少能完整地测量衍射花样的主极大和±1 级次极大，并使主极大处光电流 i_0 的大小为能使检流计偏转 100 格(使用检流计×0.1 挡，其零点值调至标尺端点 60 格处).

(3) 为使测量准确，应检查衍射花样的光强分布是否对称. 方法是用光电池检查±1 级次极大的光电流是否相等，同时粗测它们相对主极大的距离是否相等来. 如果不相等，可进一步微调狭缝的横向位置和缝宽(注意将缝宽控制在 0.1～0.3mm 之间)等.

(4) 测量光强分布(应在激光器点燃半小时后做测量,以保证光强的稳定).旋转测距支架上的测微螺旋,使光电池的进光小孔从左到右(或从右到左)逐点扫描,每隔 1mm 记录一次光电流值 i,并注意记录主极大、各级次极大和极小值(测量时,还应注意探测器的暗电流和周围杂散光所引起的光电流,应先测量这部分光电流值,以对测量数据做出修正).

(5) 作光强分布曲线.根据测量数据,在坐标纸上做出相对光电流 i/i_0(在光电池线性条件下即为相对光强 I/I_0)与位置 x 的关系曲线,即衍射光强分布曲线,并与理论结果进行比较.

2. *测量单缝宽度 a*

由上面衍射光强分布曲线求单缝宽度 a,并用投影仪(或读数显微镜)直接测量 a,将两者结果进行比较.

3. *调节可变单缝的宽度,观察衍射图样的变化.*

实验完毕后,将各仪器的电源断开,光点检流计的倍率挡转至短路状态.

注意:不要正对着激光束观察,也不要用手去触摸激光管电极!

【习题】

(1) 什么叫夫琅禾费衍射? 用 He-Ne 激光做光源的实验装置(图 4.9.3)是否满足夫琅禾费衍射条件,为什么?

(2) 当缝宽增加一倍时,衍射花样的光强和条纹宽度将会怎样改变? 如缝宽减半,又怎样改变?

实验 4.10 衍 射 光 栅

光栅是一种重要的分光元件,它可以把入射光中不同波长的光分开.利用光栅分光制成的单色仪和光谱仪已被广泛应用.光栅分为透射光栅和反射光栅两类,本实验使用的是平面透射光栅,它相当于一组数目极多的等宽、等间距的平行排列的狭缝.

目前使用的光栅主要通过以下方法获得:(1) 用精密的刻线机在玻璃或镀在玻璃的铝膜上直接刻划;(2) 用树脂在优质母光栅上复制;(3) 采用全息照相的方法制作全息光栅.实验室通常使用复制光栅或全息光栅.

【实验目的】

(1) 观察光栅衍射现象,了解衍射光栅的主要特点.

(2) 掌握在分光计上用透射光栅测定光波波长、光栅常数及角色散的方法.

【实验器材】

分光计、平行平面反射镜、汞灯、透射光栅.

【实验原理】

1. 光栅分光原理

如图 4.10.1 所示，G 为光栅，光栅刻线方向垂直于纸面. 根据衍射理论，当一束平行光入射到光栅平面上时，则透射光按衍射规律向各方向传播，经透镜 L 会聚后，在透镜第二焦平面上形成一组亮条纹（又称光谱线）. 各级亮纹产生的条件是：

$$d(\sin\theta \pm \sin i) = k\lambda \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2\cdots) \tag{4.10.1}$$

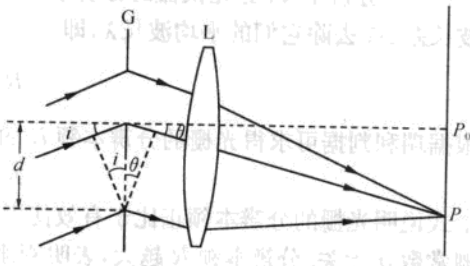


图 4.10.1

(4.10.1)式称为光栅方程. 式中，d 是光栅常数，θ 是衍射角，i 是入射光线与光栅法线的夹角，k 是光谱级次，λ 是光波波长. 括号中的正号表示入射光和衍射光在法线的同侧，而负号表示它们在法线的异侧.

如果入射光不是单色光，则由(4.10.1)式可知，除 $k=0$ 外，其余各级谱级将按波长的次序依次排开.

当平行光垂直入射时，$i=0$，光栅方程简化为

$$d\sin\theta = k\lambda \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2\cdots) \tag{4.10.2}$$

这时在 $\theta=0$ 的方向上可以观察到中央谱线极强（称为零级谱线），其他级次的谱线则对称地分布在零级谱线的两侧. 图 4.10.2 是汞灯光谱示意图.

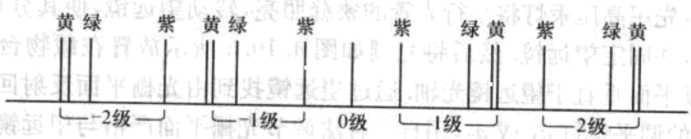


图 4.10.2

依据(4.10.2)式，用分光计测出各条谱线的衍射角 θ，若已知入射光波波长，则可求得光栅常数 d；若已知光栅常数 d，则可求得入射光波长 λ. 由于衍射角 θ 最大不得超过 90°，由(4.10.2)式可知某光栅能够测定的最大波长 λ_m 不能超过光栅常数 d，即 $\lambda_m < d$.

2. 光栅的基本特性

衍射光栅的基本特性有两个：一是角色散率，二是分辨本领.

(1) 角色散率. 光栅的角色散率是指在同级光谱中两条谱线衍射角之差 $\Delta\theta$ 与其波长差 $\Delta\lambda$ 之比，即

$$D_\theta = \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \tag{4.10.3}$$

将式(4.10.3)微分得

$$D_\theta = \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = \frac{k}{d\cos\theta_k} \tag{4.10.4}$$

由上式可知，光栅的角色散率与光栅常数 d 成反比，与级次 k 成正比. 但角色散率与光栅中衍射单元的总数 N 无关，它只反映两条谱线中心分开的程度，而不涉及它们是否能够分辨. 当衍射角 θ_k 很小时，(4.10.4)式中的 $\cos\theta_k\approx1$，角色散率 D_θ 可以近似看作常数，此时 $\Delta\theta$ 与 $\Delta\lambda$ 成正比，故光栅光谱又称为匀排光谱.

(2) 分辨本领. 分光仪器的分辨本领 R 通常定义为两条刚可被该仪器分辨开的谱线波长差 $\Delta\lambda$ 去除它们的平均波长 λ，即

$$R=\frac{\lambda}{\Delta\lambda} \tag{4.10.5}$$

根据瑞利判据可求得光栅的分辨本领 R 的表达式为

$$R=kN \tag{4.10.6}$$

上式说明光栅的分辨本领正比于有效使用面积内衍射单元总数 N 和光谱的级次 k，与光栅常数 d 无关. 分辨本领 R 越大，表明刚刚能被分辨开的波长差 $\Delta\lambda$ 越小，该光栅分辨细微结构的能力越高.

【实验内容】

1. 仪器调节

(1) 参照实验 4.3，调节分光计至使用状态.

(2) 调节光栅. 分光计调节好后，将光栅置于载物台上，并进行下列调节：

① 调节光栅平面与平行光管光轴垂直. 目的是使光栅平面平行于仪器主轴，并使入射光垂直于光栅平面，保证入射角为零.

调节方法：先用高压汞灯将平行光管的狭缝照亮，转动望远镜，使其分划板叉丝竖线对准狭缝中央，并固定望远镜. 然后将光栅如图 4.10.3 所示放置在载物台上，转动载物台，大致使光栅平面垂直于望远镜光轴. 通过望远镜找到由光栅平面反射回来的十字像，调节载物台下的调平螺钉 a_1 或 a_2，用自准直法调节光栅平面严格与望远镜光轴垂直(只需对光栅一个表面进行调节，调节时，不能调动望远镜的倾斜度). 此时，通过望远镜应能看到如图 4.10.4 所示的图像. 至此，光栅平面已与分光计的主轴平行，同时与入射光垂直. 调好后，随即固定载物台.

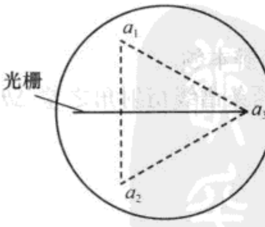
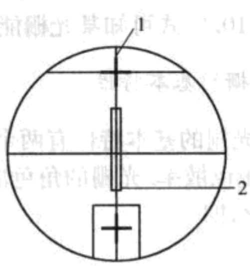


图 4.10.3



1. 十字反射像; 2. 狭缝像

图 4.10.4

② 调节光栅使其刻线与仪器主轴平行. 放松望远镜的制动螺钉，转动望远镜观察中

央亮纹两侧的光谱线是否等高.若光栅刻线与仪器主轴不平行,则谱线不等高,这时可调节载物台下的调平螺钉 a_3,直到各条谱线等高为止,如图 4.10.5 所示.调好后再检查光栅平面是否仍与平行光管光轴垂直,若有变化,则按上述两个步骤反复调节,直到两个条件均能满足为止.

注意:光栅调好后,游标盘(连同载物台)应固定,测量时只转动望远镜(连同刻度盘),不再转动和碰动光栅.

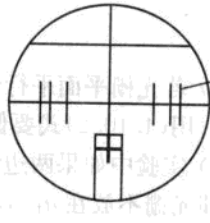


图 4.10.5

2. 测定光栅常数

以汞灯的 546.1nm 的绿光为已知波长,测出其 $k=\pm1$ 级的衍射角,重复测量三次,求 $\bar{d}$.注意+1级与−1级的衍射角相差不能超过几分,否则应重新检查入射角是否为零.

3. 测定未知光波波长及角色散率

以汞灯其他谱线(例如选其中的两条黄线)为未知波长.测出各谱线所对应的衍射角 θ,重复测量三次,取平均值.将结果及前面所得到的 d 值代入(4.10.2)式,计算各谱线波长,与公认值比较,计算相对误差.再利用(4.10.3)式计算两条黄线的一级谱线的角色散率(D_θ 的单位为 rad/nm).

4. 观察分辨本领与光栅中衍射单元的总数 N 的关系

用钠光灯代替汞灯照亮狭缝,调节缝宽直到在望远镜中能分辨钠光的两条一级谱线.调整光源位置,使谱线最亮.然后用一个可变单缝光阑,套在平行光管的物镜上,调节可变缝与平行光管狭缝平行,适当调节光阑的宽度,减少光栅的有效使用面积(即 N 减小),观察钠光两条黄色谱线随 N 的减小发生的变化,记录观察结果,并用读数显微镜测出这两条谱线刚能分辨时的狭缝光阑的宽度,由(4.10.5)式和(4.10.6)式分别计算一级谱线的分辨本领 R,并进行比较.

以上测得数据录入表 4.10.1.

表 4.10.1

谱线	0 级读数		+1 级读数		−1 级读数		衍射角 θ
	游标 1	游标 2	游标 1	游标 2	游标 1	游标 2	
绿							
黄 1							
黄 2							

【预习思考】

(1) 光栅分光原理与棱镜分光原理有什么不同?

(2) 由(4.10.2)式推导出 $\Delta d/d$ 及 $\Delta\lambda/\lambda$ 的表达式,分析它们的大小与 θ_k 的关系.假设望远镜观察到的±1,±2,±3 级衍射条纹都比较清晰,你认为测哪一级可减小误差?

【习题】

(1) 若光栅平面平行于仪器主轴但不垂直于平行光管光轴,能否按(4.10.2)式测量 d 和 λ? 用(4.10.2)式要保证什么实验条件? 实验中如何实现?

(2) 实验中如果两边谱线不等高,对测量结果有无影响? 如果光栅平面不通过仪器主轴(即光栅不放在 a_1、a_2 两螺钉的中垂线上)对实验结果有无影响?

(3) 仍然用本实验的分光计,换一个光栅常数相同但总刻线数目 N 更多的光栅,能否提高该套装置的分辨本领? 请说明理由.

(4) 如果没有分光计,你能否用 He-Ne 激光、直尺测出光栅常数? 简述你的测试方案.

实验 4.11　光偏振现象的研究

对于光的偏振现象的研究,使人们对光的传播(反射、折射、吸收和散射等)规律有了新的认识.特别是近年来利用光的偏振性开发出来的各种偏振光元件、偏振光仪器和偏振光技术在现代科学技术中发挥了极其重要的作用,在光调制器、光开关、光学计量、应力分析、光信息处理、光通信、激光和光电子学器件等领域中,都大量使用偏振技术.

【实验目的】

(1) 观察光的偏振现象,加深对光的偏振性质的认识.
(2) 用反射起偏的方法测定玻璃的折射率.
(3) 了解产生与检验偏振光的元件,掌握产生与检验偏振光的方法.

【实验器材】

分光计、平行平面反射镜、偏振片(两片)、$\lambda/2$ 片、$\lambda/4$ 片(两片)、钠光灯.

【实验原理】

光是电磁波,它的电场和磁场矢量相互垂直,且都垂直于光的传播方向.通常用电矢量代表光矢量,并将光矢量和光的传播方向所构成的平面称为振动面.在与传播方向垂直的平面内,光矢量可能有各式各样的振动状态,称为光的偏振态.若光矢量的方向是任意的,且各方向上光矢量大小的时间平均值是相等的,这种光称为*自然光*.若光矢量可以采取任何方向,但不同的方向其振幅不同,某一方向振动的振幅最强,而与该方向垂直的方向振动最弱,则称为*部分偏振光*.若光矢量的方向始终不变,只是它的振幅随相位改变,光矢量的末端轨迹是一条直线,则称其为*线偏振光*或*平面偏振光*.若光矢量的方向和大小随时间作有规律的变化,其末端在垂直于传播方向的平面内的轨迹呈椭圆形或圆形,这样的光称为*椭圆偏振光*或*圆偏振光*.

能使自然光变成偏振光的器件或装置,称为起偏器,用来检验光是否为偏振光的器件或装置,称为检偏器.实际上起偏器也可用来作检偏器.

1. 产生线偏振光的方法

(1) 反射和折射起偏. 当自然光由空气入射到各向同性介质(如玻璃)的表面时，反射光和折射光一般为部分偏振光. 改变入射角，反射光的偏振程度可以改变. 设介质的折射率为 n，当入射角为

$$i = i_B = \arctan n \tag{4.11.1}$$

时，反射光为线偏振光，其振动面垂直于入射面，而透射光为部分偏振光，如图 4.11.1 所示，其中黑点“·”表示振动面垂直于入射面的线偏振光，短线“—”表示振动面平行于入射面的线偏振光. 式(4.11.1)称为布儒斯特定律，i_B 为布儒斯特角.

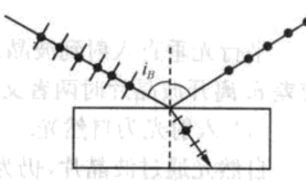


图 4.11.1

如果自然光是以布儒斯特角 i_B 入射到一叠互相平行的玻璃片堆上，则经多次反射，最后从玻璃片堆透射出来的光也接近于线偏振光. 玻璃片的数目越多，透射光的偏振度越高.

(2) 晶体的双折射起偏. 当自然光入射于某些各向异性晶体(如方解石)时，经晶体的双折射所产生的寻常光(o 光)和非常光(e 光)都是线偏振光. o 光光矢量垂直于 o 光的主平面(晶体中某条光线与晶体光轴构成的平面，称为该光线的主平面)，e 光光矢量则平行于 e 光的主平面. 尼科耳棱镜就是利用方解石的双折射现象制成的偏振器.

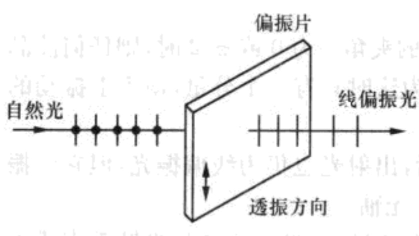


图 4.11.2

(3) 偏振片. 它是利用某些有机化合物晶体的二向色性制成的. 当自然光通过偏振片后，光矢量垂直于偏振片透振方向的分量几乎被完全吸收，光矢量平行于透振方向的分量几乎完全通过，因此，透射光基本上成为线偏振光，如图 4.11.2 所示.

2. 波晶片

波晶片是从单轴双折射晶体中切割下来的平面平行板，其表面平行于光轴，也叫做相位延迟片. 如图 4.11.3 所示，一束平行的线偏振光垂直入射到波晶片后，便分解为振动方向与光轴方向垂直的 o 光和与光轴方向平行的 e 光. 这两种光虽然在晶体内的传播方向一致，但它们在晶体内传播的速度却不相同. 于是，o 光与 e 光通过波晶片后就产生固定的相位差 δ，即

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e)d \tag{4.11.2}$$

式中，λ 为入射光的波长，d 为晶片厚度，n_o 和 n_e 分别为 o 光和 e 光的主折射率.

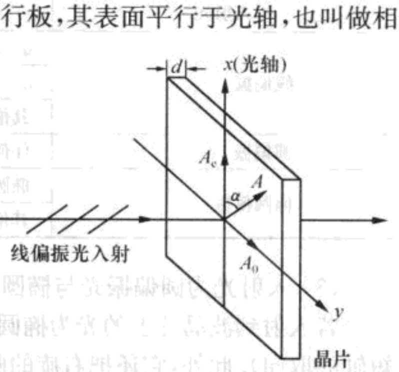


图 4.11.3

对于某种单色光，能产生 $\delta=2k\pi$ 的波晶片，称为此单色光的全波片；能产生 $\delta=(2k+1)\pi$的波晶片，称为半波片($\lambda/2$ 片)；能产生 $\delta=(2k+1)\frac{\pi}{2}$的波晶片，称为 1/4 波片($\lambda/4$ 片). 通常波片用云母片剥离成适当厚度或用石英晶体研磨成薄片. 由于石英晶体是正晶体，其 o 光比 e 光的速度快，沿光轴方向振动的光(e 光)传播速度慢，故光轴称为慢轴，与之垂直的方向称为快轴. 对于负晶体制成的波片，光轴就是快轴.

3. 通过波晶片的光的偏振态的变化

平行光垂直入射到波晶片内，分解为 e 光和 o 光. 透过波晶片，两者间产生一附加相位差 δ. 离开波晶片时两者又合而为一，合成光的偏振性质决定于 δ 及入射光的性质.

(1) 入射光为自然光.

自然光通过波晶片，仍为自然光. 因为自然光的两个正交分量之间的相位差是无规的，通过波晶片，引入一恒定的相位差 δ，其结果还是无规的.

(2) 入射光为线偏振光.

由图 4.11.3 可知，一束振动方向与光轴成 α 角的线偏振光垂直入射到波晶片后，会产生振动方向相互垂直的 e 光和 o 光，其电矢量 $\boldsymbol{E}$ 的大小分别为 $E_e=E\cos\alpha$，$E_o=E\sin\alpha$，通过波晶片后，二者产生一附加相位差，离开波晶片时合成波的偏振性质，决定于 δ 和 α.

① 如果入射线偏振光的振动方向与波晶片光轴的夹角 α 为 0 或 $\pi/2$ 时，则任何波晶片对它都不起作用，出射光仍为原来的线偏振光. 因为这时只有一个分量，谈不上振动的合成与偏振态的改变.

② 如果 α 不为 0 或 $\pi/2$，线偏振光通过 $\lambda/2$ 片后，出射光也仍为线偏振光，但它的振动方向旋转了 2α，即出射光和入射光的电矢量对称于光轴.

③ 线偏振光通过 $\lambda/4$ 片后，则可能产生线偏振光、圆偏振光和长轴与光轴垂直或平行的椭圆偏振光，这取决于入射线偏振光振动方向与光轴夹角 α(见表 4.11.1).

表 4.11.1 偏振光经过 $\lambda/4$ 片后偏振态的变化

入射光	$\lambda/4$ 片的位置	出射光
线偏振	$\alpha=0°$或 $90°$	线偏振
	$\alpha=45°$	圆偏振
	其他位置	椭圆偏振
圆偏振	任何位置	线偏振
椭圆偏振	椭圆的长(短)轴与光轴平行或垂直	线偏振
	其他位置	椭圆偏振

(3) 入射光为圆偏振光与椭圆偏振光.

若入射到波晶片上的光为椭圆偏振光，$\lambda/2$ 片将改变椭圆偏振光的椭圆取向(即长、短轴的取向). 此外，它还把右旋的圆偏振光或椭圆偏振光变为左旋，或左旋变为右旋，而 $\lambda/4$ 片也可将椭圆或圆偏振光变为线偏振光(见表 4.11.1).

4. 偏振光的检测

按照马吕斯定律,如果线偏振光的振动面与检偏器的透振方向夹角为 α,则强度为 I_0 的线偏振光通过检偏器后,光强变为

$$I = I_0\cos^2\alpha \tag{4.11.3}$$

显然,当以光的传播方向为轴旋转检偏器时,每转 90°透射光强将交替出现极大和消光. 如果部分偏振光或椭圆偏振光通过检偏器,当旋转检偏器时,虽然透射光强每隔 90°也从极大变为极小,再由极小变为极大,但无消光位置. 而圆偏振光通过检偏器,当旋转检偏器时,透射光强则无变化.

【实验内容】

1. 用反射起偏的方法测量平板玻璃的折射率

(1) 调节分光计至使用状态(参看实验 4.3).

(2) 将待测平面玻璃板置于载物台上,调节载物台的倾斜度,使玻璃板的法线与分光计主轴垂直.

(3) 用钠光灯照亮平行光管狭缝,使平行光管出射的光束射到玻璃板上,转动载物台以改变入射角,转动望远镜使反射光进入望远镜筒. 将检偏器套在望远镜物镜前,并让检偏器透振方向垂直入射面,观察到狭缝像,旋转 90°,狭缝像变暗. 若不出现消光,则还需改变入射角和转动望远镜,同时微调检偏器,找到消光位置. 此时的入射角即为布儒斯特角 i_B. 用叉丝竖线对准此时反射光的方位,记录分光计的读数 θ_1、θ_2.

(4) 转动望远镜,使其正对平行光管,测出入射光的方位角 θ_1'、θ_2'. 则望远镜转过的角度为

$$\varphi = \frac{1}{2}[\,|\theta_1'-\theta_1| + |\theta_2'-\theta_2|\,] \tag{4.11.4}$$

入射角为

$$i_B = \frac{1}{2}(180° - \varphi) \tag{4.11.5}$$

(5) 重复测量 5 次,求 i_B 的平均值,将结果代入(4.11.1)式计算玻璃的折射率.

2. 观察线偏振光通过 $\lambda/2$ 片后的现象

(1) 将起偏器 P 套在平行光管物镜前,检偏器 A 套在望远镜物镜前. 调节 P 与 A 至正交位置(即消光位置),将 $\lambda/2$ 片置于载物台上,转动 $\lambda/2$ 片 360°,能看到几次消光? 为什么?

(2) 将 $\lambda/2$ 片任意转动一角度,破坏消光现象. 再将 A 转动 360°,又能看到几次消光?

(3) P、A 仍保持正交,转动 $\lambda/2$ 片至消光位置(此时 $\lambda/2$ 片的慢轴或快轴与 P 的透光方向平行),以此时 P 和 $\lambda/2$ 片位置对应角度 $\alpha=0°$,保持 $\lambda/2$ 片不动,将 P 转 $\alpha=15°$,破坏消光. 再沿与转 P 相反的方向转 A 至消光位置,记录 A 所转过的角度 α'.

(4) 继续(3)的实验,依次使 $\alpha=30°$、45°、60°、75°、90°(α 值是相对 P 的起始位置而言

的)，转 A 到消光位置，记录相应的角度 α'. 将结果填入表 4.11.2.

表 4.11.2

α	α'	线偏振光经 $\lambda/2$ 片后振动方向转过的角度
0°		
15°		
30°		
45°		
60°		
75°		
90°		

3. 用 $\lambda/4$ 片产生椭圆偏振光和圆偏振光

(1) 取下 1/2 波片，将 $\lambda/4$ 片置于正交的 P、A 之间，转动 $\lambda/4$ 片至消光位置.

(2) 依次将 $\lambda/4$ 片从消光位置转过 15°、30°、45°、60°、75°、90°角，分别再使 A 转动 360°，观察光强的变化，根据观察结果画图或用文字说明透过 $\lambda/4$ 片的出射光的偏振态，将结果填入表 4.11.3.

表 4.11.3

$\lambda/4$ 片转动角度	N_2 旋转 360°观察到的现象	出射光的偏振态
15°		
30°		
45°		
60°		
75°		
90°		

4. 圆偏振光和椭圆偏振光的检验

(1) 在正交的 P、A 之间，使 $\lambda/4$ 片由消光位置转过 45°角，这时通过 $\lambda/4$ 片后的出射光为圆偏振光. 在 $\lambda/4$ 片和 A 之间再插入第二个 $\lambda/4$ 片，使 A 旋转 360°，观察和记录出射光强的变化，并加以解释.

(2) 取下 P 和第一个 $\lambda/4$ 片，让自然光直接入射到第二个 $\lambda/4$ 片上，再使 A 旋转 360°，观察光强的变化.

比较上述结果，能得出什么结论？

(3) 自行设计实验步骤，区别椭圆偏振光与部分偏振光.

【预习思考】

(1) 按光矢量的不同振动状态，可以把光分为哪五种偏振态？

(2) 产生线偏振光的方法有哪几种？

(3) 如何利用测布儒斯特角的原理,确定一块偏振片的透光轴位置?

(4) 实验时为什么必须使入射光与波片表面垂直?

(5) 实验内容2、3中,插入$\lambda/2$片和$\lambda/4$片,将波片转至消光位置的目的是什么?

【习题】

(1) 本实验为什么要用单色光源照明?根据什么选择单色光源的波长?若光波波长范围较宽,会给实验带来什么影响?

(2) 仅用一个$\lambda/4$片和一个偏振片,能否分析某一单色光(所用$\lambda/4$片是针对该单色光的)的任一偏振态?若能,试写出分析步骤.

(3) 试说明椭圆偏振光通过$\lambda/4$片后变成线偏振光的条件.

(4) 自然光垂直照在一块$\lambda/4$片上,再用一块偏振片观察该波片的透射光,转动偏振片360°,能看到什么现象?固定偏振片转动波片360°,又看到什么现象?为什么?

实验4.12 全息照相

全息照相是一种能记录并再现物光波全部信息的新技术,其基本原理虽然早在1948年由英籍科学家丹尼斯·盖柏(Dennis Gabor)提出,但由于当时缺乏相干性好的光源,因而几乎没有引起人们注意.直到20世纪60年代激光问世后,全息照相技术才付诸实施并得到迅速发展.目前,全息照相技术已广泛应用于精密计量、无损检测、信息存储及处理、遥感技术和生物医学等方面.全息照相技术不仅可用于可见光波,也可用于红外、超声、微波、X射线、β射线等领域.本实验将通过对光学全息图的拍摄和再现观察,了解全息照相的基本原理、主要特征及操作要领.

【实验目的】

(1) 了解全息照相的基本原理.

(2) 掌握制作全息图的基本条件和实验方法.

【实验器材】

全息台及支架附件、He-Ne激光器、快门及曝光定时器、分束器一片、反射镜两片、扩束透镜两片、激光功率计(或光电池及光点检流计)、被摄物体、全息干板、暗房冲洗设备.

【实验原理】

普通照相是通过成像系统(照相机系统)使物体成像在感光材料上,材料上的感光强度只与物体表面光强分布有关,因为光强与振幅平方成正比,所以它只记录了物体光波的振幅信息,无法记录物体光波的相位差别,因而得到的仅仅是物体的二维平面像,缺乏立体感.

全息照相则不同,它是利用一束相干参考光与物体发出或反射的光波产生干涉,以干涉条纹的形式把物光波前的全部信息(振幅和相位)记录下来.直接观察拍摄好的全息图

看不到像，只有用照明光按一定方向照在全息图上，通过全息图的衍射，才能再现物光波前，使我们看到原物的三维立体像. 因此，全息照相包含两个过程：第一，把物体光波的全部信息记录在感光材料上，称为记录(拍摄)过程；第二，利用所选定的光源，照明已记录全部信息的感光材料，使其再现原始物体的过程，称为再现过程.

下面分别讨论透射式和反射式全息照相原理.

1. 透射式全息照相(激光再现全息照相)

1) 全息记录

由于感光介质对光的强弱很敏感，而对光的相位毫无反应，所以必须将相位的变化转变为强度的变化，这就需要利用光的干涉原理，使物体光波与另一列相干光波叠加，产生干涉条纹，并用感光材料记录这些干涉条纹.

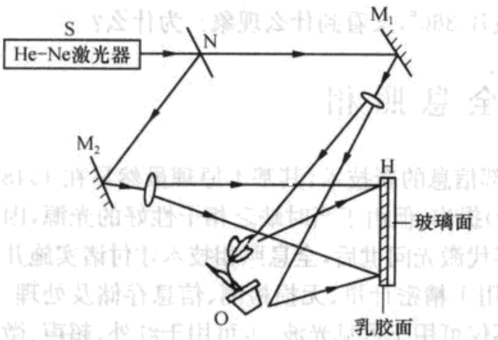


图 4.12.1

图 4.12.1 是全息照相记录过程中使用的光路. 从 He-Ne 激光器 S 射出的激光束经分束器 N 分为两束，一束经反射镜 M_1 反射并扩束后照射在物体 O 上，物体 O 的漫射光(即物光)射到感光板(全息干板)H 上；另一束作为参考光，经反射镜 M_2 反射并扩束后直接射到 H 上. 两光束光程近似相等，且符合相干条件，故在 H 平面相遇产生一组稳定的干涉条纹. 干涉图样的形状反映了物光与参考光之间的相位关系，干涉条纹的明暗对比反映了物光波的振幅分布，干涉条纹的疏密则反映了物光和参考光的夹角情况. 感光板经曝光和暗室处理后所记录的干涉图样，称为全息图.

如图 4.12.2 所示，设 xy 平面为感光板 H 平面，O 表示物光的一个点光源，R 表示参考光的点光源，它们在 H 平面上任一点(x,y)的复振幅分别为

$$O(x,y)=A_o(x,y)\exp[\mathrm{i}\varphi_o(x,y)]$$
$$R(x,y)=A_r(x,y)\exp[\mathrm{i}\varphi_r(x,y)]$$

两光波叠加后，(x,y)点的强度为

$$\begin{aligned}I(x,y)&=|O(x,y)+R(x,y)|^2\\&=|O(x,y)|^2+|R(x,y)|^2+O(x,y)R^*(x,y)\\&\quad+O^*(x,y)R(x,y)=A_o^2+A_r^2\\&\quad+A_oA_r\exp[\mathrm{i}(\varphi_o-\varphi_r)]\\&\quad+A_oA_r\exp[-\mathrm{i}(\varphi_o-\varphi_r)]\end{aligned}\tag{4.12.1}$$

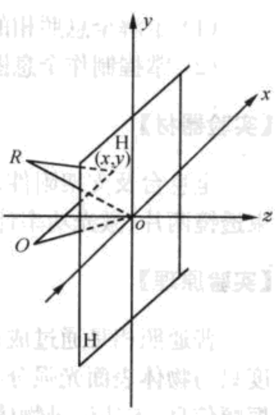


图 4.12.2

(4.12.1)式右边第一项和第二项为物光和参考光的光强，对 H 上任一点(x,y)，这两项为常数；第三项和第四项为干涉项，反映了两相干光的振幅和相对相位的关系. 可见在底片上，干涉图样将物光波的振幅和相位两种信息全部记录

下来了.

若感光板的曝光和显影都控制在记录介质的 t-H 曲线(振幅透过率 t 随曝光量 H 变化的关系)的线性部分,则感光板上任一点的振幅透过率 $t(x,y)$ 与光强 $I(x,y)$ 成线性关系,即

$$t(x,y)=t_0+\beta I(x,y) \tag{4.12.2}$$

式中,t_0、β 为与感光板上任一点位置无关的常量,t_0 称为感光底片的灰雾度,β 是 t-H 曲线线性部分的斜率,对于正片,$\beta>0$;对于负片,$\beta<0$,如图 4.12.3 所示.

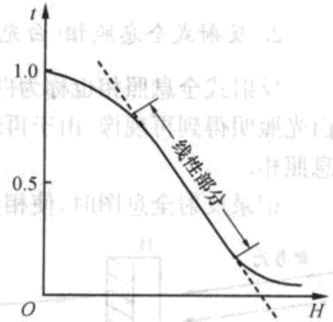


图 4.12.3　全息干板的 t-H 曲线

上面讨论了物光作为一个点光源所产生的球面波与参考光的干涉.整个物由无数点光源所组成,因而整个全息图就是无穷多个球面波与参考光波干涉所组成的复杂干涉条纹.

2) 全息再现

为了再现物光波,一般用与参考光波相似的光照射全息图.设再现光波复振幅为

$$c(x,y)=A_c(x,y)\exp[\mathrm{i}\varphi_c(x,y)]$$

则透过全息图后的复振幅分布为

$$u(x,y)=c(x,y)t(x,y)=u_1(x,y)+u_2(x,y)+u_3(x,y)+u_4(x,y) \tag{4.12.3}$$

式中

$$u_1(x,y)=t_0A_c\exp(\mathrm{i}\varphi_c)$$
$$u_2(x,y)=\beta(A_o^2+A_r^2)\cdot A_c\exp(\mathrm{i}\varphi_c)$$
$$u_3(x,y)=\beta A_cA_r\exp[\mathrm{i}(\varphi_c-\varphi_r)]\cdot A_o\exp(\mathrm{i}\varphi_o)$$
$$u_4(x,y)=\beta A_cA_r\exp[\mathrm{i}(\varphi_c+\varphi_r)]\cdot A_o\exp(-\mathrm{i}\varphi_o)$$

以上讨论表明,全息图相当于一个复杂的衍射光栅.再现光波经全息图后,透射光包含三个不同的部分,如图 4.12.4 所示.(4.12.3)式右边的第一项和第二项与再现光波只差一个常系数,称为直射光或 0 级衍射波;第三项和第四项所产生的光波在 0 级衍射波的两侧,称为 +1 级和 −1 级衍射波,当取再现的光波与参考光波相同(即 $c(x,y)=R(x,y)$)时,+1 级衍射波准确地再现了原来的物光波(只是振幅大小有变化),这是一发散波,它在全息图后面形成了与物体完全相同的虚像,称原始像.−1 级衍射波包含了物光的共轭波,它是一束会聚波,其会聚点就是实像的位置.一般来说,实像有畸变,若要得到无畸变的实像,需用一束与参考光波共轭的再现光波照射全息图.

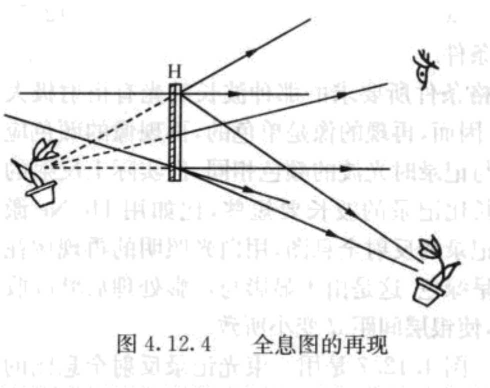


图 4.12.4　全息图的再现

2. 反射式全息照相(白光再现全息照相)

反射式全息照相也称为白光再现全息照相. 这种全息照相用相干光记录全息图,而用白光照明得到再现像. 由于再现时眼睛接收的是白光在底片上的反射光,故称为反射式全息照相.

记录反射全息图时,使相干的物光和参考光从全息干板的两边照射,如图 4.12.5 所示. 当物光和参考光的夹角 θ 接近 180°时,两光波的相干叠加所形成的干涉条纹实际上是一些峰值强度面,经显影处理后,在峰值强度面上形成高密度的银层,其作用相当于一些反射平面(角 θ 的等分面),这些平面近似平行于乳胶层表面. 设相邻两银层之间的距离为 d,有

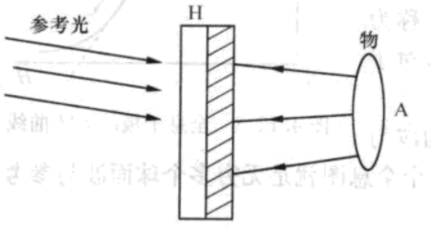


图 4.12.5

$$d \approx \frac{\lambda}{2\sin(180°/2)} = \frac{\lambda}{2} \tag{4.12.4}$$

当用波长为 632.8nm 的激光作光源时,这一距离约为 0.32μm(在乳胶内,$n>1$,因此银层间距离还要更小),而全息干板乳胶层厚度为 6～15μm,这样在乳胶层厚度内就能形成几十片金属银层,因而全息图是一个具有三维结构的衍射物体.

反射全息图对于光的衍射作用与三维光栅的衍射相同,如图 4.12.6 所示. 若再现光波以与银层成 φ 角方向照明全息图,则一部分光被银层散射,一部分光透过,各峰值强度面层所散射的光相干叠加形成衍射极大值.

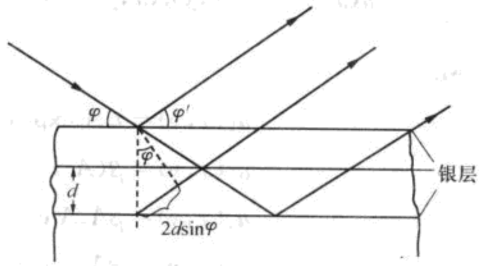


图 4.12.6

同一面层的散射光,当满足反射定律($\varphi=\varphi'$)时是同相相加的;对于不同面层之间的散射光,则须满足光栅方程. 如图 4.12.6 所示

$$2d\sin\varphi = \lambda \tag{4.12.5}$$

这就是反射全息图再现的条件,也称为布拉格条件.

如果用白光照明全息图,则只有满足布拉格条件所要求的那种波长的光有衍射极大值. 因而,再现的像是单色的,再现像的颜色应该与记录时光波的颜色相同,但实际上反射的波长比记录的波长要短些,比如用 He-Ne 激光记录的反射全息图,用白光照明的再现像往往呈绿色. 这是由于显影与定影处理后乳胶收缩,使银层间距 d 变小所致.

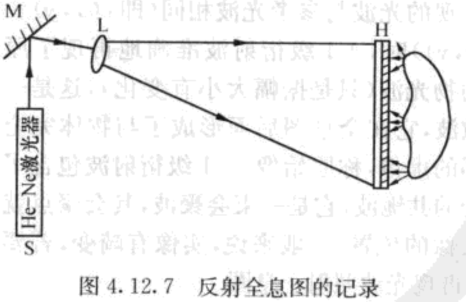


图 4.12.7　反射全息图的记录

图 4.12.7 是用一束光记录反射全息图的装置图,扩束后的激光束从感光板 H 的背面

入射，作为参考光，透过感光板的光束照射到被摄物上，由物体漫射回来的光作为物光照射到 H 上. 物光、参考光之间的夹角近似为 180°. 被摄物体应该是表面漫反射强的首饰、纪念章之类，拍摄时物和感光板尽量靠近些.

为了再现虚像，应使白光源从全息图背面（玻璃面）去照明全息图，如图 4.12.8 所示. 白光源从全息图的正面（乳胶面）照射，可得实像.

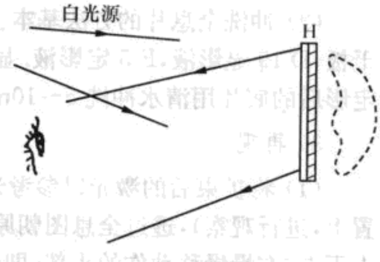


图 4.12.8 反射全息图虚像的再现

3. 全息照相的实验条件

为了拍摄合乎要求的全息图，必须具备下列基本条件：

(1) 要有好的相干光源. 一般实验中常采用 He-Ne 激光器作为光源. 为了保证物光和参考光之间良好的相干性，应尽可能使两束光的光程相等.

(2) 保证全息照相所用系统的稳定性. 由于全息干板上所记录的干涉条纹非常细密，相当于波长量级，在拍摄过程中微小的干扰都会引起干涉条纹模糊. 例如，记录过程中若底片位移了一微米，则条纹就看不清了. 因此，系统中光学元件和各种支架都要用磁钢牢固地吸在具有防震装置的平台钢板上，以防止地面振动的干扰. 此外气流通过光路，强烈的声波振动会引起空气密度的变化，导致光程的不稳定，所以曝光过程中应避免大声喧哗、来回走动、吹风等.

(3) 要有较高分辨率的全息感光板. 通常使用分辨率在 1500～2000 线 · mm^{-1} 之间的感光板即可. 以透射式全息照相为例，物光与参考光束间的夹角常控制在 50° 以内，因为夹角越大，干涉条纹间距越小，条纹越密，对全息感光板的分辨率要求也越高.

(4) 了解和使用显影、定影、冲洗等有关暗室处理技术（见附录）.

【实验内容】

1. 透射式全息图的记录与再现

1) 布置光路

在全息台上按如图 4.12.1 所示布置光路，并作以下调节：

(1) 调节各元件的高低及倾斜度，以保证各激光束构成的平面平行于全息台面.

(2) 物光与参考光光程大致相等.

(3) 物光与参考光的夹角为 30°～50°.

(4) 物光与参考光的光强比为 1∶2～1∶5（可用激光功率计在全息干板位置测量或用白屏放在干板位置进行目测）.

2) 曝光与冲洗

(1) 根据所测全息干板处的总光强，定出曝光时间，调好曝光定时器，关上照明灯，关闭快门遮断激光. 将全息干板安放在干板架上，并注意使乳剂面向着被摄体，稍等 1～2 分钟，待整个系统稳定后即可曝光.

(2) 冲洗全息片的方法基本上和冲洗普通照相底片一样. 本实验采用天津Ⅰ型全息干板,D-19 显影液,F-5 定影液. 显影温度 18～20℃,时间 2～3min,定影时间 5～15min,定影后的底片用清水冲洗 5～10min,晾干(见附录).

3) 再现

(1) 将扩束后的激光以参考光相同的角度照射全息图(可将全息图放在记录时的位置上,进行观察),透过全息图朝原来放置物体的方向看去,就可看到物体的虚像. 注意:当上下、左右慢慢移动你的头部(即改变观察位置)时,虚像有什么不同(图像的透视是否改变,不同部分的视差效应是否明显)?

(2) 平移全息图,使其向光源靠近或远离,观察虚像的位置、大小有何变化?

(3) 在黑纸屏上开一个直径约 1cm 的小孔,一边在全息图上移动这个孔,一边通过孔观察,全息图的每一部分是否都能再现物体的完整像? 当被利用的全息图面积减小时,像的分辨率是否改变,为什么?

(4) 用白光点光源代替激光,全息图能否再现虚像? 在光源前分别加上红色滤光片和蓝色滤光片再进行观察,结果会怎样? 试比较由激光再现的像与由非相干光源再现的像的差别.

(5) 用参考光的共轭光或未扩束的激光束照射全息图(干板的玻璃面朝向入射光),用毛玻璃屏接收再现实像. 当屏与全息图距离不同时,屏上所截得的像的大小和清晰度也不同,只有像质最佳的位置,才是实像的位置.

2. 反射全息图的记录和再现

(1) 按照如图 4.12.7 布置光路. 把被摄物固定在带有干板架的载物台上,使物体靠近干板的位置放置,让扩束后的激光均匀照明物体.

(2) 关闭快门遮断激光,将全息干板安放在干板架上,乳剂面朝向被摄物,激光束从全息干板的玻璃面入射. 稳定 1～2min 后,用曝光定时器控制快门曝光,曝光时间几秒钟.

(3) 冲洗. 方法与前面相同. 晾干后即得一张反射全息图.

(4) 用白光照射全息图,观察物体的虚像和实像.

【习题】

(1) 全息照相与普通照相有什么不同? 拍摄全息图,应具备哪些实验条件?

(2) 怎样通过全息图再现物体不畸变的实像? 请画图说明.

(3) 为什么反射全息图要用白光再现?

(4) 怎样检查全息台的防震性能? 试利用全息台现有元器件设计一实验光路,并说明之.

【附录】 全息底片的冲洗

全息底片的冲洗要按暗室操作规程,选择合适的冲洗条件正确进行操作,否则会影响底片质量甚至造成废片.

(1) 根据要显影的感光材料的类型和希望显影后影像要达到的效果(如反差大小、层

次多少等),选用合适的显影液.对全息底片来说,要求显影后反差大,一般采用D-19高反差强力显影液.其配方为:温水(50℃)800ml、米吐尔 2g、无水碳酸钠 48g、无水亚硫酸 90g、溴化钾 5g、对苯二酚 8g,配好后加蒸馏水至 1000ml.

(2) 根据感光材料的感色性,选用合适的安全灯.全息底片有不同型号,分别对不同的光波长敏感,对 He-Ne 激光的天津Ⅰ型全息干板,暗室处理用暗绿灯.

(3) 显影液、定影液尽可能在 20℃左右的温度下使用.

(4) 必须按照显影、停显、定影、流水冲洗和晾干的顺序进行暗室处理,每个过程需要有足够的处理时间.

显影:显影液温度约 20℃,显影时间 2～3min(这是参考值,应根据实验中全息底片实际曝光量的大小进行调整).

停显:停显液配方为冰醋酸 13.5ml,加蒸馏水至 1000ml.停显时间 30～40s.

定影:定影液温度约 20℃,定影时间 5～15min.推荐用 F5 定影液,配方为:蒸馏水(50℃)800ml、硼酸(结晶)7.5g、结晶硫代硫酸钠 240g、钾钒 15g、无水亚硫酸钠 15g、冰醋酸 13.5ml,配好后加蒸馏水至 1000ml.

水洗:需长期保存的底片,放入流水中冲洗需 20～30min.

(5) 处理底片时,需要对它适当翻动,以防止显影、定影不均匀、不充分,而使它们报废.

(6) 必须注意暗室清洁.各种药液盘中的竹夹不能混用,不得将停显液、定影液带入显影液中,暗室处理完成后,把药液分别倒回各原瓶中,不可倒错.冲片所用的盘、夹子等用具均应洗净.

实验 4.13 阿贝成像原理与空间滤波

【实验目的】

(1) 加深对傅里叶光学中空间频谱和空间滤波等概念的理解.

(2) 熟悉阿贝成像原理,了解透镜孔径对成像分辨率的影响.

【实验器材】

光具座、He-Ne 激光器、白光光源、透镜、可变狭缝、可变圆孔光阑、全息光栅、铜丝网、显微物镜.

【实验原理】

1. 光学傅里叶变换

在信息光学中,常用傅里叶变换来表达和处理光的成像过程.现设一光场,在 xy 平面上的振幅分布为 $g(x,y)$,可以将这样一个空间分布展开为一系列基元函数 $\exp[i2\pi(f_xx+f_yy)]$的线性叠加,即

$$g(x,y)=\iint_{-\infty}^{+\infty}G(f_x,f_y)\exp[\mathrm{i}2\pi(f_xx+f_yy)]\mathrm{d}f_x\mathrm{d}f_y \tag{4.13.1}$$

式中，f_x、f_y 分别为 x、y 方向上的空间频率，量纲为$[L]^{-1}$，$G(f_x,f_y)$为相应于空间频率为 f_x、f_y 的基元函数的权重，也称为光场 $g(x,y)$的空间频谱. $G(f_x,f_y)$可由 $g(x,y)$的傅里叶变换求得，其关系式为

$$G(f_x,f_y)=\iint_{-\infty}^{+\infty}g(x,y)\exp[-\mathrm{i}2\pi(f_xx+f_yy)]\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{4.13.2}$$

$g(x,y)$和 $G(f_x,f_y)$实质上是对同一光场的两种等效描述.

当 $g(x,y)$是一个空间的周期函数时，其空间函数是不连续的. 例如空间频率为 f_0、光栅常数为 $x_0(f_0=1/x_0)$的一维透射光栅，其透射光振幅分布可展开成傅里叶级数

$$g(x)=\sum_{-\infty}^{+\infty}G_n\exp[\mathrm{i}2\pi nf_0x] \tag{4.13.3}$$

式中，$n=0,\pm1,\pm2,\cdots,n$，不同的各项相应的空间频率 $f=0,\pm f_0,\pm 2f_0,\cdots$

用光学方法可以很方便地获得二维图像 $g(x,y)$的空间频谱 $G(f_x,f_y)$，只要在一焦距为 F 的会聚透镜的前焦面上放一振幅透过率为 $g(x,y)$的图像当做物，并以波长为 λ 的单色平面波垂直照射图像，则在透镜后焦面(x',y')上得到的光场复振幅分布就是 $g(x,y)$的傅里叶变换 $G(f_x,f_y)$，其中 f_x、f_y 与坐标 x'、y'的关系为

$$f_x=\frac{x'}{\lambda F},\quad f_y=\frac{y'}{\lambda F} \tag{4.13.4}$$

(x',y')面称为频谱面（或称傅氏面），见图 4.13.1. 我们称通过透镜实现二维傅里叶变换的方法为光学傅里叶变换. 频谱面上的光强分布为$|G(f_x,f_y)|^2$，称为功率谱，也就是物的夫琅禾费衍射图.

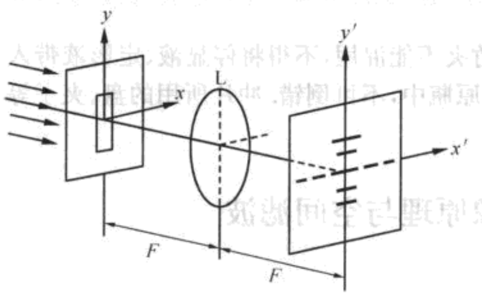


图 4.13.1

2. 阿贝成像原理

早在 1893 年阿贝(E. Abbe)在研究提高显微镜分辨本领时，就提出了相干光照明下显微镜的成像原理. 他认为在相干光照明下，显微镜的成像可分为两步：第一步是通过物的衍射光在物镜的后焦面上形成夫琅禾费衍射斑，也即是物体的频谱；第二步是各衍射斑作为新的子波源向前发出球面波，互相叠加形成[中间]像，这个像可以通过目镜观察到.

二次成像过程本质上就是两次傅里叶变换. 第一步把物面光场的空间分布 $g(x,y)$变为频谱面上的空间频率分布 $G(f_x,f_y)$. 第二步则是再作一次傅里叶变换，又将 $G(f_x,f_y)$还原到空间分布. 成像的这两个步骤见图 4.13.2. 为方便起见，我们假设物是一个一维光栅，单色平行光垂直照射在光栅上，经衍射

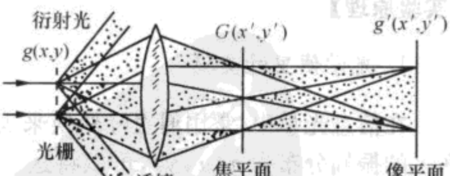


图 4.13.2

分解成为不同方向的很多束平行光(每一束平行光相应于一定的空间频率),经过物镜分别聚焦在后焦面上形成点阵(频谱图).然后代表不同空间频率的光束又重新在像平面上复合而成像.

如果这两次傅氏变换完全是理想的,即信息没有任何损失,则像和物应完全相似(可能有放大或缩小).但一般来说像和物不可能完全相似,这是由于透镜的孔径是有限的,总有一部分衍射角度较大的高频信息不能进入透镜而被丢失.因此像的信息总是少于物的信息.高频信息主要反映了物的细节,如果高频信息受到了孔径的限制而不能到达像平面,则无论显微镜有多大的放大倍数,也不可能在像平面上显示出这些高频信息所反映的细节,这是显微镜分辨率受到限制的根本原因.

3. 光学空间滤波

通过傅里叶变换,物所包含的各种不同空间频率分量在频谱面上彼此分开,如果在频谱面(透镜后焦面)上人为地放置一块吸收模板,以减弱或去掉某些空间频率成分,则将使像面上的图像发生相应的变化.这种对图像作处理的方法称为空间滤波,频谱面上的模板称为空间滤波器.下面介绍几种常用的空间滤波器:

(1) 低通滤波器如图 4.13.3(a)所示.它可滤去频谱面上离光轴较远的高频成分,保留离光轴较近的低频成分,因而图像的精细结构消失.



(a) (b) (c) (d) (e)

图 4.13.3

(2) 高通滤波器如图 4.13.3(b)所示.它的作用是滤去低频部分,而让高频部分通过,所以图像轮廓明显.若把高通滤波器的挡光圆屏变小,滤去零频成分,则可除去图像中的背景,提高像质.

(3) 带通滤波器如图 4.13.3(c)所示.它的作用是滤去低频和高频部分,只让中频部分通过.

(4) 方向滤波器.方向滤波器可以是一个狭缝,如图 4.13.3(d)所示;也可以是扇形,如图 4.13.3(e)所示.设物为铜丝网格,如果将狭缝放在沿 x 方向,则只有沿 x 方向衍射的物面信息能通过.在像面上就突出了 y 方向的线条.

【实验内容】

1. 阿贝成像原理实验

(1) 在光具座上布置如图 4.13.4 所示的实验光路.透镜 L_1(或显微物镜)和 L_2 组成倒装望远系统,将激光扩束成具有较大截面的平行光束.让平行激光束垂直照射在一维光栅(20~30 线对 · mm^{-1})上.

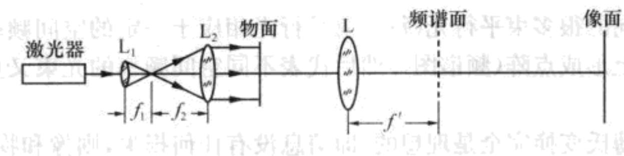


图 4.13.4

(2) 在物后放一焦距 $f'=250$mm 的透镜 L，组成一放大成像系统，使物面到像面的距离大于 3m. 调节各元件共轴，调节透镜 L 的位置，使像面上出现清晰的光栅像. 调节光栅，使像面上的光栅条纹沿竖直方向(调节成像时，可在物面前暂放一块毛玻璃，以便在扩展光源照明下，找到成像的精确位置).

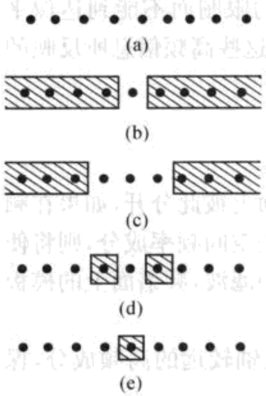


图 4.13.5

(3) 用一毛玻璃屏放在透镜 L 的后焦面(即频谱面)上，将得到如图 4.13.5(a)所示的 0，±1，±2，±3，…一排清晰衍射光点，用卡尺测出±1，±2，±3 级衍射点到零级之间的距离 x'，由(4.13.4)式求出和它们相应的空间频率 f_x.

(4) 在频谱面上放置可调狭缝及其他附加光阑，按图 4.13.5(b)～(e)分别通过一定的空间频率成分，在表 4.13.1 依次记录像面上成像的特点，特别注意观察图 4.13.5(d)、(e)两条件下图像的差异，并对图像变化作出解释.

表 4.13.1　像面成像特点

条　件	通过的衍射点	图面情况	简要解释
a	全部		
b	0 级		
c	0 级，±1 级		
d	除±1 级外		
e	除 0 级外		

(5) 保留上述光路，用一个二维正交光栅代替一维光栅. 则在频谱面上获得如图 4.13.6(a)所示的二维点阵分布(即正交光栅的频谱)，而在像面上得到放大了的正交光栅像，测出像面上的网格间距.

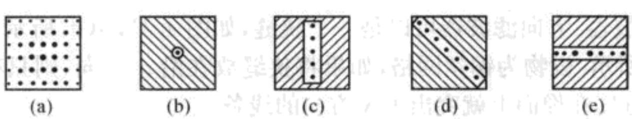


图 4.13.6

(6) 依次在频谱面上放置如图 4.13.6(b)～(e)所示的零频和不同方向的滤波器，观察像面上图像的变化，测量像面上的条纹间距，并作出相应解释.

2. 空间滤波实验

(1) 将正交光栅与一个透明的“光”字重叠在一起作为物，通过透镜 L 成像在像面上，

其放大像如图 4.13.7 所示.

(2) 将一个可变的圆孔光阑(低通滤波器)放在透镜 L 的后焦面上,逐步缩小光阑孔径,观察像面上图像的变化,并记录变化的特征.

(3) 换一个"漏光"十字板作为物,在像面上观察到物的像如图 4.13.8(a)所示. 在透镜 L 的后焦面上放一个挡光圆屏(高通滤波器),挡去空间频谱的中心部分,观察并记录像面上的变化.

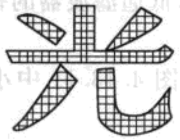


图 4.13.7

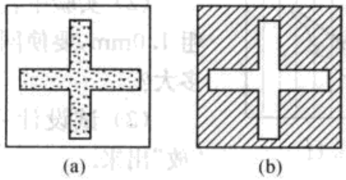


图 4.13.8

试从空间滤波原理解释实验中观察到的现象.

3. θ 调制实验

所谓 θ 调制是以不同取向的光栅调制物面图像上的不同部位,经空间滤波后,像面上各相应部位呈现不同的彩色.

(1) 用全息照相方法制作一个 θ 调制的图像,即有不同取向的光栅组成的图像,如图 4.13.9(a)所示. 图中的太阳、房子、草地分别由三个不同取向的光栅(100 条 · mm^{-1})组成,三个光栅的取向互成一定角度.



图 4.13.9

(2) 以溴钨灯为光源,上述 θ 调制的图像为物,按图 4.13.10 在光具座上布置光路. 灯前放一小孔 S,聚光透镜 L_1 将 S 成像于透镜 L_2 前面的 P_2 面上. 物放在紧靠透镜 L_1 的 P_1 平面上,经透镜 L_2 成像于屏幕 P_3 上. 光源的成像面 P_2 为频谱面.

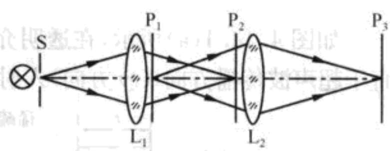


图 4.13.10

(3) 将一块烟熏玻璃放在 P_2 平面上,此时在烟熏玻璃上可看到光栅的衍射图,三行不同取向的衍射光斑相应于不同取向的光栅,见图 4.13.9(b). 这些衍射极大值除零级以外均有色散. 用一火柴棍抹去烟熏玻璃上相应于草地的一级衍射图上绿光所在位置的烟灰,只让绿光能透过. 用同样的办法,使相应于房子的一级衍射的黄光和相应于太阳的一级衍射的红光能透过. 这时在屏 P_3 上将出现绿色的

草地、黄色的房子和红色的太阳.

【习题】

(1) 根据本实验结果,你如何理解显微镜、望远镜的分辨本领? 为什么说一定孔径的物镜只能具有有限的分辨本领? 如增大放大倍数能否提高仪器的分辨本领?

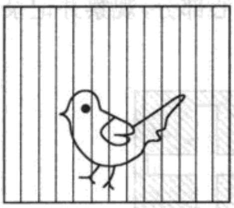


图 4.13.11

(2) 实验中若正交光栅网格为 10 条 · mm^{-1},透明字的笔画粗 1.0mm,要使网格消失和字迹模糊,低通滤波器的孔径应该有多大?

(3) 试设计一个光学滤波器,把图 4.13.11 中小鸟从笼中"放"出来.

实验 4.14 超声光栅

当超声波在介质中传播时,超声波使介质产生弹性应力或应变,导致介质密度的空间分布出现疏密相间的周期性变化,因而导致介质的折射率相应变化. 光束通过这种介质,就好像通过光栅一样,会产生衍射现象,这种现象称为超声致光衍射(亦称声光效应). 人们把这种载有超声的透明介质称为超声光栅. 利用超声光栅可以测定超声波在介质中的传播速度.

【实验目的】

(1) 了解超声致光衍射的原理.

(2) 学会一种利用超声光栅测量超声波在液体中传播速度的方法.

【实验器材】

超声光栅(超声池)、SG-1 型超声光栅仪、分光计、测微目镜、钠光灯等.

【实验原理】

如图 4.14.1(a)所示,在透明介质中,有一束超声波沿 Oz 方向传播,另一束平行光垂直于超声波传播方向(Oy 方向)入射到介质中,当光波从声束区出射时,就会产生衍射现象.

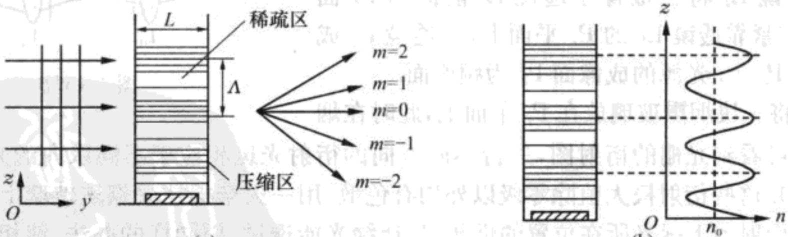


图 4.14.1

实际上由于声波是弹性纵波，它的存在会使介质（如纯水）密度 ρ 在时间和空间上发生周期性变化（图 4.14.1(a)），即

$$\rho(z,t)=\rho_0+\Delta\rho\sin\left(\omega_s t-\frac{2\pi}{\Lambda}z\right) \tag{4.14.1}$$

式中，z 为沿声波传播方向的空间坐标，ρ 为 t 时刻 z 处的介质密度，ρ_0 为没有超声波存在时的介质密度，ω_s 是超声波的角频率，Λ 是超声波波长，$\Delta\rho$ 是密度变化的幅度. 因此介质的折射率随之发生相应变化，即

$$n(z,t)=n_0+\Delta n\sin\left(\omega_s t-\frac{2\pi}{\Lambda}z\right) \tag{4.14.2}$$

式中，n_0 为平均折射率，Δn 为折射率变化的幅度. 考虑到光在液体中的传播速度（$10^{10}\,\mathrm{cm\cdot s^{-1}}$）远大于声波的传播速度（$10^5\,\mathrm{cm\cdot s^{-1}}$），可以认为在液体中，由超声波所形成的疏密周期性分布，在光波通过液体的这段时间内是不随时间改变的，因此，液体的折射率仅随位置 z 而改变（图 4.14.1(b)），即

$$n(z)=n_0+\Delta n\sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda}z\right) \tag{4.14.3}$$

由于液体的折射率在空间有这样的周期分布，当光束沿垂直于声波方向通过液体后，光波波阵面上不同部位经历了不同的光程，波阵面上各点的相位由下式给出

$$\varphi=\varphi_0+\Delta\varphi=\frac{\omega n_0 L}{c}-\frac{\omega L\Delta n}{c}\sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda}z\right) \tag{4.14.4}$$

式中，L 为声速宽度，ω 为光波角频率，c 为光速. 通过液体压缩区的光波波阵面将落后于通过稀疏区的波阵面. 原来的平面波阵面变得折皱了，其折皱情况由 $n(z)$ 决定，见图 4.14.2. 可见载有超声波的液体可以看成一个相位光栅，光栅常数等于超声波波长. 声光衍射可分为两类：

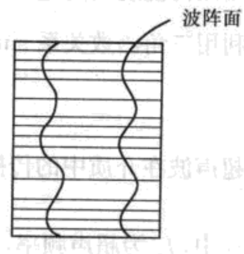


图 4.14.2

(1) 当 $L\ll\Lambda^2/2\pi\lambda_0$（$\lambda_0$ 为真空中光波波长）时，就会产生对称于零级的多级衍射，即拉曼-奈斯（Raman-Nath）衍射，这和平面光栅的衍射几乎无区别①，满足下式的衍射光均在衍射角为 φ 的方向上产生极大光强

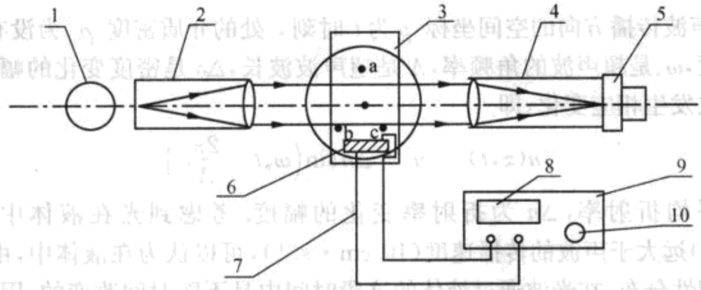
$$\sin\varphi=\frac{m\lambda_0}{\Lambda}\quad(m=0,\pm1,\pm2,\cdots) \tag{4.14.5}$$

(2) 当 $L\gg\Lambda^2/2\pi\lambda_0$ 时，产生布拉格（Bragg）衍射，声光介质相当于一个体光栅，其衍射光强只集中在满足布拉格公式（$\sin\varphi_B=m\lambda_0/2\Lambda,\quad m=0,\pm1$）的一级衍射方向，且 ±1 级不同时存在. 由于布拉格衍射需要高频（几十兆赫兹）超声源，实验条件较为复杂，故本实验采用拉曼-奈斯衍射装置.

实验装置如图 4.14.3 所示. 超声池是一个长方形玻璃液槽，液槽的两通光侧面（窗

① 由于介质中的声波是一个行波，折射率不仅是空间的周期性函数，而且还是时间的周期性函数（见(4.14.2)式），故衍射光的光频 ω 发生多普勒频移，成为 $\omega\pm m\omega_s$，其中 m 为级次. 当衍射光与声波传播方向成锐角时，取正号；成钝角时，取负号.

口)为平行平面.液槽内盛有待测液体(如水).换能器为压电陶瓷晶片,晶片两面引线与液槽上盖的接线柱相连.当压电陶瓷晶片由SC-Ⅰ型超声光栅仪输出的高频振荡信号驱动时,就会在液体中产生超声波.



1.钠光灯; 2.平行光管; 3.超声池; 4.望远镜(去掉目镜筒); 5.测微目镜;
6.压电陶瓷晶片; 7.导线; 8.频率显示窗; 9.超声光栅仪; 10.调频旋钮

图 4.14.3

超声池置于分光计的载物台上,使其通光侧面与平行光管光轴垂直.当钠光灯照亮平行光管狭缝时,由平行光管出射的平行光束垂直于超声波传播方向(Oz 方向)投射到液槽上,自液槽窗口出射的光,经望远镜物镜(焦距 $f=170.0\text{mm}$)会聚在物镜的后焦面上.用测微目镜观测由超声光栅产生的衍射条纹.若一级衍射条纹与零级衍射条纹的间距为 x,利用三角函数关系 $\sin\varphi\approx\frac{x}{f}(f\gg x)$,并由(4.14.5)式可得

$$\frac{x}{f}=\frac{\lambda_0}{\Lambda} \tag{4.14.6}$$

超声波在介质中的传播速度为

$$v_s=f_s\Lambda \tag{4.14.7}$$

式中,f_s 为超声频率,可由超声光栅仪频率窗读出.将(4.14.6)式代入(4.14.7)式可得

$$v_s=\frac{\lambda_0 f_s f}{x} \tag{4.14.8}$$

f、λ_0 已知,用测微目镜测出衍射条纹间距 x,并读出共振频率 f_s,即可求出超声波在待测液体中的传播速度 v_s 值.

【实验内容】

(1) 调整分光计到使用状态(参看实验4.3).

(2) 将超声池用酒精清洗干净并吹干后,把待测液体倒入玻璃液槽中,液面高度以超出压电陶瓷晶片上边缘1cm为好.

(3) 置超声池于分光计载物台上,放置的方位与载物台下三个调平螺丝a、b、c的关系如图4.14.3所示.转动望远镜正对平行光管,并使望远镜与平行光管共轴;利用自准直法,调节载物台下的调平螺丝,使超声池通光表面垂直于望远镜和平行光管光轴.

(4) 取下望远镜目镜,换上测微目镜(连同换接套筒).调节目镜看清分划板十字刻

线，再以平行光管出射的平行光为准，调节望远镜(利用换接套筒改变测微目镜与望远物镜距离)使平行光管的狭缝像清晰.

(5) 开启超声光栅仪电源，从望远镜中可看到衍射光谱. 调节频率调节旋钮，使电振荡频率与压电换能器固有频率共振. 此时，衍射光谱级次会显著增多而且明亮. 为使平行光束垂直于超声束传播方向，可微调载物台，使观察到的衍射光谱左右对称，级次、谱线亮度一致. 经过上述仔细调节，一般应观察到±3级以上的衍射谱线.

(6) 衍射条纹间距的测量. 用测微目镜沿一个方向逐级测量其位置读数(例如，从−3,−2,−1,0,+1,+2,+3,…)，再用逐差法求出条纹间距 x 的平均值.

(7) 读出共振时频率计的读数 f_s，利用(4.14.8)式求出超声波在待测液体中的传播速度 v_s.

在同一频率 f_s 下，对绿光(546.1nm)、黄光(578.0nm)重复上述步骤测量三次.

【注意事项】

(1) 实验过程中要防止震动，也不要碰触连接超声池和高频电源的两条导线. 因导线分布电容的变化会对输出电频率有微小影响. 只有压电陶瓷片表面与对面的玻璃槽壁表面平行时才会形成较好的表面驻波，因而实验时应将超声池的上盖盖平.

(2) 一般共振频率在10MHz左右，SG超声光栅仪给出8.5～11.5MHz可调范围. 在稳定共振时，数字频率计显示的频率值应是稳定的. 要特别注意不要使频率长时间调在11MHz以上，以免振荡线路过热.

(3) 测量完毕应将超声池内待测液体倒出，不能长时间浸泡在液槽内.

(4) 声波在液体中的传播与液体温度有关，要记录待测液体温度，并进行温度修正. 超声波在25℃水中传播速度为1497m·s^{-1}，如果水温在75℃以下，温度每降低1℃，声速降低2.5m·s^{-1}.

【习题】

(1) 实验时可以发现，当超声频率 f_s 升高时，衍射条纹间距 x 加大，反之则减小，这是为什么?

(2) 由驻波理论知道，相邻波腹间和相邻波节间的距离都等于半波长，为什么超声光栅的光栅常数等于超声波的波长呢?

(3) 要实现拉曼-奈斯衍射，对超声频率和超声池的宽度(指沿光传播方向上的宽度)有何要求?

(4) 超声光栅与平面衍射光栅有何异同?

实验4.15　光电效应

当光束照射到某些金属表面上时，会有电子从金属表面即刻逸出，这种现象称为光电效应. 对光电效应现象的研究，使人们进一步认识到光的波粒二象性的本质，促进了光量子理论的建立和近代物理学的发展. 现在光电效应以及根据光电效应制成的各种光电器

件,已经被广泛地应用于工农业生产、科研和国防等各领域.

【实验目的】

(1) 通过实验加深对光的量子性的认识.

(2) 验证爱因斯坦方程,并测定普朗克常量.

【实验原理】

光电效应的实验原理如图 4.15.1 所示. 用强度为 P 的单色光照射光电管阴极 K 时,阴极释放出的光电子在电场的加速作用下向阳极 A 迁移形成光电流,改变外加电压 U_{AK},测量出光电流 I 的大小,即可得出光电管的伏安特性曲线.

光电效应的基本实验事实如下:

(1) 对应于某一频率,光电效应的 $I—U_{AK}$ 关系如图 4.15.2 所示. 由图可见,对一的频率,有一电压 U_0,当 $U_{AK} \leqslant U_0$ 时,电流为零,这个相对于阴极为负值的阳极电压 U_0,被称为截止电压.

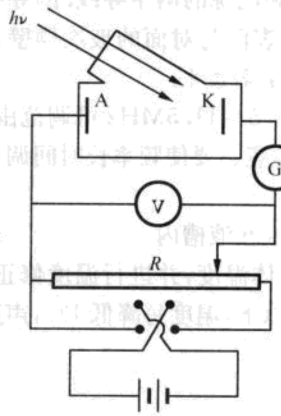


图 4.15.1

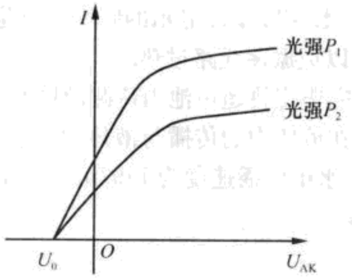


图 4.15.2　同一频率,不同光强时光电管的伏安特性曲线

(2) 当 $U_{AK} \geqslant U_0$ 时,I 迅速增加,然后趋于饱和,饱和光电流 I_m 的大小与入射光的强度成正比.

(3) 对于不同频率的光,其截止电压不同,如图 4.15.3 所示.

(4) 作截止电压 U_0 与频率 ν 的关系图如图 4.15.4 所示. U_0 与 ν 成正比关系. 当入射

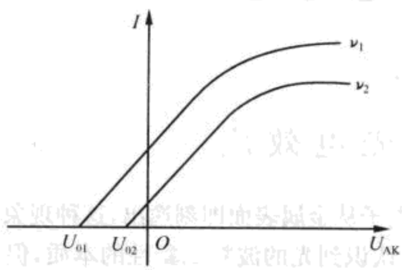


图 4.15.3　不同光频率时光电管的伏安特性曲线

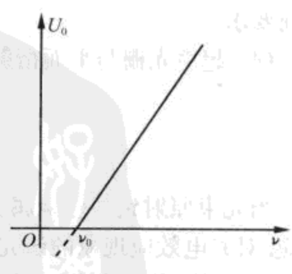


图 4.15.4

光频率低于某极限值 ν_0(ν_0随不同金属而异)时,不论光的强度如何,照射时间多长,都没有光电流产生.

(5) 光电效应是瞬时效应.即使入射光的强度非常微弱,只要频率大于 ν_0,在开始照射后立即有光电流产生,所经过的时间为 10^{-9}秒的数量级.

上述光电效应的实验规律是电磁波的经典理论所不能解释的.1905 年爱因斯坦根据普朗克的量子假设,提出了光子假说.他假设光束是由能量为 $h\nu$ 称为光子的微粒组成,其中 h 是普朗克常量.当光子照射到金属表面上时,一次为金属中的电子全部吸收,而无需积累能量的时间.电子把能量的一部分用来克服金属表面对它的吸引力,余下部分转变为电子离开金属表面后的动能,根据能量守恒原理,爱因斯坦提出了著名的光电效应方程

$$h\nu = \frac{1}{2}m\nu_0^2 + W \tag{4.15.1}$$

式中,W 为金属的逸出功,$\frac{1}{2}m\nu_0^2$为光电子获得的初始动能.

由上式可知,入射到金属表面的光频率越高,逸出的电子动能越大,所以即使阳极电位比阴极电位低时也会有电子落入阳极形成光电流,直至阳极电位低于截止电压,光电流才为零,此时有关系

$$eU_0 = \frac{1}{2}m\nu_0^2 \tag{4.15.2}$$

阳极电位高于截止电压后,随着阳极电位的升高,阳极对阴极发射的电子的收集作用加强,光电流随之上升;当阳极电压高到一定程度,已把阴极发射的光电子几乎全收集到阳极时,再增加 U_{AK}时 I 不再变化,光电流出现饱和,饱和光电流 I_m 的大小与入射光的强度 P 成正比.

光子的能量 $h\nu_0 < W$ 时,电子不能脱离金属,因而没有光电流产生.产生光电效应的最低频率(截止频率)是 $\nu_0 = W/h$.

将(4.15.2)式代入(4.15.1)式可得

$$U_0 = \frac{h}{e}\nu - \frac{W}{e} \tag{4.15.3}$$

此式表明截止电压 U_0 是频率 ν 的线性函数,直线的斜率 $k=h/e$.只要用实验方法得出不同频率对应的截止电压,求出直线斜率,就可算出普朗克常量 h.

值得注意的是,实测光电流的曲线(图 4.15.5)与理论曲线(阴极光电曲线)在 U_{AK}的负值区域有明显偏差,引起这种偏差的主要原因有:①光电管阳极和阴极间的漏电流.②受环境杂散光影响形成的本底电流.③光电管制作过程中的阳极材料上沾有少许阴极材料,所以只要有光照射到阳极上就会产生阳极反向电流.④由热激发产生的光电流,其中以漏电流和阳极反向电流影响最大.

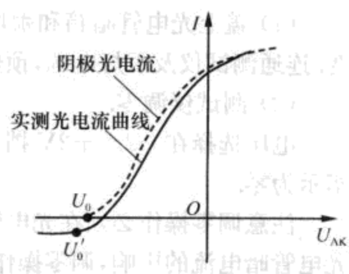


图 4.15.5

由于反向电流的影响,实测光电流曲线下移,光电流的截止电压点对应实验曲线上的拐点 U_0'.如果光电管

的质量好，反向光电流的影响小，U_0' 与 U_0 基本重合.

【仪器介绍】

光电效应实验仪如图 4.15.6 所示. 主要由光源(高压汞灯及电源)、接收暗箱(滤光片、光阑、光电管)和测试仪组成. 光源与接收暗箱安装在带有刻度尺的导轨上，可以根据实验需要调节二者之间的距离.

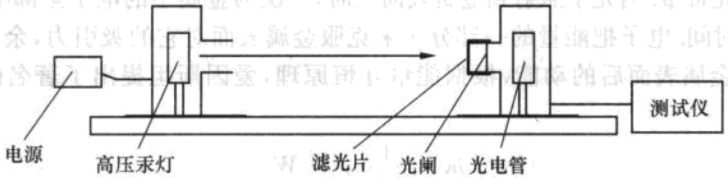


图 4.15.6　实验装置图

(1) 高压汞灯. 在其发光的光谱范围内较强的谱线有 365.0nm、404.7nm、435.8nm、546.1nm、577.0nm、579.1nm.

(2) 滤光片. 仪器配有五种带通型滤光片，它们对应于五条较强的 Hg 谱线，其透射的波长分别为 365.0nm、404.7nm、435.8nm、546.1nm 和 577.0nm. 使用时，将滤光片安装在接收暗箱的进光窗口上，以获得所需要的单色光.

(3) 光阑. 仪器配有孔径分别为 2mm、4mm、8mm 的光阑供实验选择.

(4) 光电管. 光谱响应范围为 320～700nm；暗电流 $I \leqslant 2\times10^{-12}$ A($-2\text{V} \leqslant U_{AK} \leqslant 0\text{V}$).

(5) 测试仪. 它包括光电管工作电源和微电流放大器两部分.

光电管工作电源为光电管提供两电极上的电压 U_{AK}，U_{AK} 由测试仪面板上的“电压”选择按钮和“电压调节”旋钮控制，并由三位半数字表显示. U_{AK} 有两挡：$-2\sim+2$V，$-2\sim+30$V，稳定度≤0.1%.

微电流放大器用于测量光电流 I. 利用“电流量程选择”开关可实现 $10^{-8}\sim10^{-13}$ A 六挡的电流值测定，并由三位半数字表显示，分辨率为 10^{-14} A，稳定度≤0.2%.

【实验内容】

1. 测试前的准备

(1) 盖上光电管暗箱和汞灯的遮光盖，将光电管与汞灯的距离调整到 40cm 并保持不变. 连通测试仪及汞灯电源，预热约 15min(汞灯一旦开启，不要随意关闭).

(2) 测试仪调零.

电压选择在 $-2\sim+2$V 挡，电流量程选择在 10^{-12} A 挡，旋转电流调节旋钮，使电流表指示为零.

注意调零操作必须在光电管和汞灯的遮光盖全盖严的状态下进行. 原则上为了避免光电管暗电流的影响，调零操作前还应拔下光电管暗箱上电流输出端 K 的高频电缆线. 考虑到本实验采用了新型光电管，暗电流、阳极反向电流很小，电缆线是否拔下对数据结

果影响不大，另外考虑到教学实验仪器的使用寿命，建议操作者不要拔下电缆线.

(3) 调整光路.

取下光电管暗箱的遮光盖，插上所用的光阑和滤光片，再取下汞灯的遮光盖(注意严禁让汞光不经过滤光片直接入射光电管)，使汞灯的出射光对准光电管入射窗口.

2. 用零电流法测定 h

一般来说，由于光电管的暗电流、阳极反向电流、本底电流和极间接触电势差等因素的影响，实测电流为零时对应的光电管的电压并非截止电压 U_0. 本实验中采用了新型光电管，光电管暗电流、阳极反向电流均很低，而极间接触电势差与入射光频率无关，对 U_0-ν 直线的斜率并无影响. 因而可把实测电流为零时对应的光电管电压值当作截止电压 U_0，此种方法称为零电流法.

将电压选择在 $-2\sim+2$V 挡，电流量程选择在 10^{-13} A 挡，重新调节测试仪零点. 将直径为 4mm 的光阑及 365.0nm 的滤光片插在光电管入射孔前，调节电压 U_{AK}，使光电流指示为零，此时测试仪中显示的电压值即可认为是与入射光频率对应的截止电压 U_0.

更换其余四个滤光片(注意随时盖上汞灯的遮光盖)，测出各自的截止电压.

重复上述步骤，测量 4 组数据，填入表 4.15.1 中.

表 4.15.1　U_0-ν 关系　　光阑孔 ϕ=______ mm

波长 λ/nm		356.0	404.7	435.8	546.1	577.0
频率 ν/$\times10^{14}$ Hz		8.214	7.407	6.879	5.490	5.196
截止电压 U_0/V	1					
	2					
	3					
	4					
	平均值					

3. 测光电管的伏安特性曲线(I-U_{AK} 曲线)

将电压选择按键置于 $-2\sim+30$V 挡，将"电流量程"选择开关置于 10^{-10} A 挡，将测试仪电流输入电缆断开，调零后重新接上，将直径为 2mm 的光阑及 435.8nm 的滤光片装在光电管暗箱光输入口上.

(1) 从低到高调节电压，记录电流从零到非零点所对应的电压值作为第一组数据，以后电压每变化一定值记录一组数据到表 4.15.2 中.

表 4.15.2　I-U_{AK} 关系

L=______ mm，ϕ=______ mm

435.8mm 光阑 2mm	U_{AK}/V										
	$I/10^{-10}$ A										
546.1nm 光阑 2mm	U_{AK}/V										
	$I/10^{-10}$ A										

(2) 换上 546.1nm 的滤光片，重复上述步骤，测量并记录数据于表 4.15.2 中.

4. 验证光电管的饱和光电流 I_m 与入射光强 P 的正比关系

当 U_{AK} 为 30V 时，将"电流量程"选择开关置于 10^{-10} A 挡，重新调零. 在同一谱线，同一入射距离下，记录光阑分别为 2mm、4mm、8mm 时对应的电流值于表 4.15.3 中. 由于照在光电管上的光强与光阑面积成正比，由表中数据可得出什么结论？

表 4.15.3 I_m-P 关系

U_{AK}=______V, L=______mm

435.8nm	光阑孔 ϕ			
	$I/\times10^{-10}$ A			
546.1nm	光阑孔 ϕ			
	$I/\times10^{-10}$ A			

5. 用补偿法测定 h(选做内容)

用补偿法测普朗克常量可消除本底电流和暗电流对结果的影响，其方法如下：使某频率光入射光电管，调节电压 U_{AK} 使电流表为零，保持该电压不变，将汞灯遮光盖盖上，此时测得的电流值 I_1 就是该频率光入射时光电管的暗电流和本底电流. 再取下汞灯遮光盖，调节 U_{AK} 使电流值指示为 I_1，此时对应电压的绝对值即可当作该频率光入射时的截止电压 U_0.

用补偿法测定 h 的实验数据采集方案和数据处理方法与零电流法相同.

【注意事项】

(1) 本实验可不必要求在暗室环境，但应尽量避免背景光强的剧烈变化.

(2) 实验过程中注意随时盖上汞灯的遮光盖，严禁让汞光不经过滤光片直接入射光电管窗口.

(3) 实验结束时应盖上光电管暗盒遮光盖和汞灯遮光盖！

【数据处理】

(1) 用线性回归法求 U_0-ν 直线的斜率 k.

根据线性回归理论，U_0-ν 直线的斜率 k 为

$$k=\frac{\bar{\nu}\cdot\overline{U_0}-\overline{\nu\cdot U_0}}{\bar{\nu}^2-\overline{\nu^2}}$$

式中，$\bar{\nu}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\nu_i$ 表示频率 ν 的平均值，$\overline{\nu^2}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\nu_i^2$ 表示频率 ν 的平方的平均值，$\overline{U_0}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}U_{0i}$ 表示截止电压 U_0 的平均值，$\overline{\nu\cdot U_0}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\nu_i\cdot U_{0i}$ 表示 ν 与 U_0 乘积的平均值.

由 $h=ek$ 求出普朗克常量，再与公认值 h_0 比较，求出百分误差 $E=\frac{h-h_0}{h_0}$. 式中

$e=1.602\times10^{-19}C, h_0=6.626\times10^{-34}\mathrm{J\cdot S}$

(2) 由表 4.15.1 数据，在坐标纸上作 U_0-ν 直线，由图求出直线的斜率 k，并由 $h=ek$ 求出普朗克常量.

(3) 由表 4.15.2 数据，在坐标纸上作出对应两种波长的 I-U_{AK} 关系曲线.

【习题】

(1) 当加在光电管两端的电压为零时，光电流不为零，这是为什么？

(2) 光电管一般都用逸出功小的金属做阴极，用逸出功大的金属做阳极，为什么？

(3) 实验时能否将滤光片放在光源的出光孔上？ 为什么？

(4) 通过实验，你觉得做好本实验应注意哪些问题？ 提出一些减小实验误差的建议.

第5章　综合与应用性实验

实验5.1　用动态法测定金属的杨氏模量

杨氏弹性模量是描述固体材料抵抗形变能力的重要物理量，是工程技术中常用的设计参数之一．测定杨氏模量的方法主要包括静态法（拉伸法）和动态法（共振法）．两种方法各有优缺点．静态法一般适用于较大的形变和常温下的测量，其优点是直观，缺点是存在弛豫过程，且不能测量玻璃、陶瓷等脆性材料，误差相对较大；而动态法的优点是设备简单，测量较为准确，且能测量材料在变温下的杨氏模量，但缺点是共振状态不易判断．

本实验学习用动态法测定金属材料的杨氏模量，要求实验过程中正确判别材料的共振峰值，学会用外延法处理数据．

【实验原理】

对于长度 $L \gg$ 直径 d、两端自由地做微小横振动的均匀细棒，其振动满足方程

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4}+\frac{\rho S}{EJ}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}=0 \tag{5.1.1}$$

式中，ρ 为棒的密度，S 为棒的截面积，$J=\int_s y^2 \mathrm{d}S$ 称为惯量矩（取决于截面的形状），E 为杨氏模量，y 为棒振动的位移，x 为位置坐标，t 为时间变量．

用分离变量法解方程，令 $y(x,t)=X(x)T(t)$ 代入方程(5.1.1)式，有

$$\frac{1}{X}\frac{\mathrm{d}^4 X}{\mathrm{d}x^4}=\frac{\rho S}{EJ}\frac{1}{T}\frac{\mathrm{d}^2 T}{\mathrm{d}t^2}$$

解得该振动方程式的通解为

$$y(x,t)=(B_1\mathrm{ch}Kx+B_2\mathrm{sh}Kx+B_3\cos Kx+B_4\sin Kx)A\cos(\omega t+\varphi)$$

式中

$$\omega=\left(\frac{K^4 EJ}{\rho S}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{5.1.2}$$

(5.1.2)式称为频率公式．频率公式对任意形状的截面、不同边界条件的试样都是成立的．我们只要用特定的边界条件定出常数 K，代入特定截面的惯量矩 J，就可以得到具体条件下的计算公式．如果悬线悬挂在试样的节点（处于共振状态的棒中，位移恒为零的位置）附近，则棒的两端均处于自由状态．此时其边界条件为自由端横向作用力 F 和弯矩 M 均为零，即

$$F=-\frac{\partial M}{\partial x}=-EJ\frac{\partial^3 y}{\partial x^3}=0$$

弯矩

$$M=EJ\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}=0$$

故有

$$\left.\frac{d^3 X}{dx^3}\right|_{x=0}=0,\quad \left.\frac{d^3 X}{dx^3}\right|_{x=l}=0,\quad \left.\frac{d^2 X}{dx^2}\right|_{x=0}=0,\quad \left.\frac{d^2 X}{dx^2}\right|_{x=l}=0$$

将通解代入边界条件，可以得到 $\cos Kl \cdot \mathrm{ch} Kl=1$，可用数值解法求得本征值 K 和棒长 l 应满足 $Kl=0, 4.730, 7.853, 10.996, 14.137, \cdots$

一般将 $K_1 l=4.730$ 所对应的频率称为基频频率，此时振幅分布如图 5.1.1(a)、图 5.1.1(b)所示.

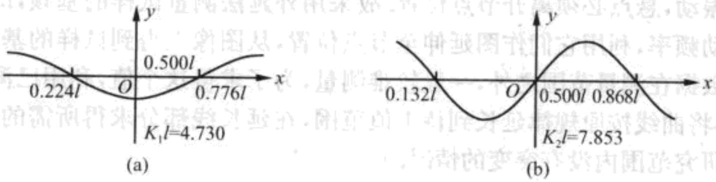


图 5.1.1　曲线对应于 $K_2 l=7.853$ 状态的振幅分布

试样在做基频振动时，存在两个节点，它们的位置距离端面为 $0.224l$ 和 $0.776l$ 处. 将第一本征值 $K_1=\frac{4.730}{l}$ 代入频率(5.1.2)式，得到自由振动的固有圆频率(基频)

$$\omega=\left(\frac{(4.730)^4 EJ}{\rho l^4 S}\right)^{\frac{1}{2}}$$

解出杨氏模量

$$E=1.9978\times10^{-3}\frac{\rho l^4 S}{J}\omega^2=7.8870\times10^{-2}\frac{l^3 m}{J}f^2$$

对于直径为 d 的圆形棒，惯量矩

$$J=\int_s y^2 ds=S\left(\frac{d}{4}\right)^2=\frac{\pi d^4}{64}$$

代入上式可得

$$E=1.6067\frac{l^3 m}{d^4}f^2 \tag{5.1.3}$$

式中，l 为棒长，d 为棒的直径，m 为棒的质量，f 为试样共振频率. 在国际单位制中杨氏模量 E 的单位为 $N\cdot m^{-2}$.

实际上，E 还和试样的直径与长度之比 d/l 的大小有关，所以(5.1.3)式右端乘以一个修正因子 R，则有

$$E=1.6067R\frac{l^3 m}{d^4}f^2 \tag{5.1.4}$$

当 $l\gg d$ 时，$R\approx1$，即为(5.1.3)式；当 $l\gg d$ 不成立时，圆棒的 R 可查表 5.1.1 获得.

表 5.1.1　试样 R 与 d/l 的关系

d/l	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06
R	1.001	1.002	1.005	1.008	1.014	1.019

当外力频率达到共振频率 ω_r 时，另一悬线处会接收到最大振幅，而固有频率与共振频率之间的关系为 $f_r=\dfrac{\omega_r}{2\pi}=\dfrac{1}{2\pi}\sqrt{\omega^2-2\beta^2}$，$\beta$ 为阻尼因数. 对于一般的金属材料，β 的最大值只有 ω 的 1%左右，所以可以用 f_r 代替 f 代入(5.1.4)式计算.

实验中，由于悬丝对试样的阻尼，所检测的共振频率大小是随悬挂点的位置而变化的. 理论上，测量试样的基频振动时，悬挂点应在节点处，即悬点距端点 $0.224l$ 和 $0.776l$ 处. 但是在这种情况下，棒的振动无法被激发，振幅为零，在示波器上只能看到一条直线. 欲激发棒的振动，悬点必须离开节点位置. 故采用外延法测量试样的基频，即测量节点周围的点的振动频率，利用它们作图延伸至节点位置，从图像上得到试样的基频.（外延法：指所需要的数据在测量范围之外，一般较难测量，为了求得这个值，利用已测得的数据绘制出曲线，再将曲线按原规律延长到待求值范围，在延长线部分求得所需的值. 此方法只适用于在所研究范围内没有突变的情况.）

【实验仪器】

功率函数信号发生器、换能器(两个)、示波器、温控器、天平、游标卡尺、螺旋测微器、测试架、待测试样等.

本实验的基本问题是测量在一定温度下试样的共振频率 f. 实验中采用如图 5.1.2 所示(此图为悬挂法，支撑法装置类似，不同的是测试棒放在换能器上面的两支撑点上). 由信号发生器输出的等幅正弦波信号，加在换能器 Ⅰ 上. 通过换能器把电信号转变成机械振动，再由悬线(或支撑物)把机械振动传给试样，使试样做横向振动. 试样另一端的悬线(或支撑物)把机械振动传给换能器Ⅱ，这时机械振动又转变成电信号. 该信号输入示波器中显示.

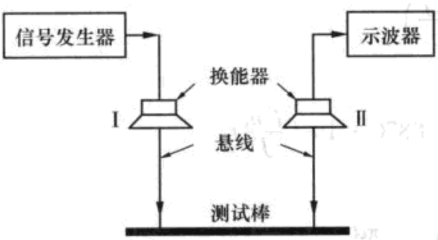


图 5.1.2 实验装置图

当信号发生器的频率不等于试样的固有频率时，试样不发生共振，示波器上几乎没有波形或波形很小. 当信号发生器的频率等于试样的固有频率时，试样发生共振，示波器的波形突然增大，这时频率计上读出的频率就是试样在该温度下的共振频率 f. 将此 f 值代入(5.1.3)式或(5.1.4)式，即可计算出该温度下的杨氏模量.

若将试样置于可控温加热炉中，不断改变加热炉的温度，即可测出不同温度下的杨氏模量.

【实验内容】

1. 测量试样的长度 l、直径 d 和质量 m

用米尺测量试样的长度 l；用游标卡尺测量试样的直径 d(注意在不同的部位和不同的方向多次测量)；用电子天平称量试样的质量 m. 为提高测量精度，以上各量至少测量 5 次，并记入表 5.1.2.

2. 测量试样在室温时的共振频率 f

(1) 室温下铜和不锈钢的杨氏模量分别约为 $1.2\times10^{11}\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $2\times10^{11}\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$，先由(5.1.3)式估算出共振频率 f，以便寻找共振点.

(2) 安装试样棒，对称悬挂并保持试样水平，悬丝与试样垂直，选择适当的悬丝长度.

(3) 按图 5.1.2 将仪器连接好，并调整仪器到正常状态.

(4) 从试样端点开始，两悬点同时向中间移动，每间隔 5mm 测量一次共振频率 f，将悬挂点到两端点的距离 x 和共振频率 f 记录在表 5.1.3 中. 每次测量时，调节信号发生器的输出频率，使示波器上观察到的共振峰的幅度达到最大值，此时信号发生器的输出频率即为该点的共振频率.

(5) 真假共振峰的判别(鉴频)

在寻找共振频率时，调节信号发生器要极其缓慢，到共振频率附近时改用"频率微调"旋钮调节，换能器及整个系统都有自己的共振频率，拾振器(换能器Ⅱ)的输入伴随有许多次极大值，故测量时一定要找到真的共振峰进行测量.

① 峰宽判别法. 真的共振峰的频率范围很窄，细微地改变信号发生器的输出频率，共振峰的幅度就会发生突变；假的共振峰频率范围很宽.

② 幅度判别法. 用手将试样托起，如果是干扰信号，则示波器上正弦波幅度不变；如果是共振信号，则共振信号的周期不变，幅度逐渐衰减(也可用手捏住换能器Ⅰ下的悬丝，可看到同样的现象).

③ 声音判别法. 发生共振时，拾振器会发生尖锐的啸叫.

3. 测杨氏模量

将试样棒放入到加热炉中，升温后测出不同温度下的共振频率.

【数据处理】

(1) 实验数据表.

表 5.1.2

测量次数	1	2	3	4	5	6	平均值
长度 l/cm							
直径 d/cm							
质量 m/g							

表 5.1.3　共振频率测量

悬点 x/mm	5	10	15	20	25	30	35	40
共振频率 f/Hz								

(2) 用坐标纸画出 f-x 曲线，由曲线确定基频 f_1.

(3) 利用不确定度传递公式 $U_r=\sqrt{\left(\frac{U_m}{m}\right)^2+\left(3\frac{U_l}{l}\right)^2+\left(2\frac{U_f}{f}\right)^2+\left(4\frac{U_d}{d}\right)^2}$ 估算出 U_r 和 $U_E=\bar{E}\cdot U_r$，写出结果表达式 $E=\bar{E}\pm U_E$.

【注意事项】

(1) 试样不可随意乱放，一定要保持清洁.

(2) 悬挂试样时，悬丝必须将试样捆紧. 测量时尽可能避免试样摆动.

(3) 实验中拿放东西要轻，不可敲击桌面和大声说话，以免对实验造成影响.

实验 5.2　多普勒效应综合实验

多普勒效应是一基本物理现象，当波源和接收器之间有相对运动时，接收器接收到的波的频率与波源发出的频率不同的现象称为多普勒效应. 多普勒效应在科学研究，工程技术，交通管理，医疗诊断等各方面都有十分广泛的应用. 例如，原子、分子和离子由于热运动使其发射和吸收的光谱线变宽，称为多普勒增宽，在天体物理和受控热核聚变实验装置中，光谱线的多普勒增宽已成为一种分析恒星大气及等离子体物理状态的重要测量和诊断手段；基于多普勒效应原理的雷达系统已广泛应用于导弹、卫星、车辆等运动目标速度的监测；在医学上利用超声波的多普勒效应来检查人体内脏的活动情况、血液的流速等. 电磁波（光波）与声波（超声波）的多普勒效应原理是一致的. 本实验既可研究超声波的多普勒效应，又可利用多普勒效应将超声探头作为运动传感器，研究物体的运动状态.

【实验目的】

(1) 掌握利用超声的多普勒效应测量声速的原理与方法.

(2) 利用多普勒效应测量物体运动过程中多个时间点的速度，研究匀加速直线运动、自由落体运动、简谐振动以及其他变速直线运动的规律.

【实验器材】

多普勒效应综合实验仪，超声发射/接收器，导轨，运动小车，支架，光电门，电磁铁，弹簧，滑轮，砝码.

【实验原理】

根据声波的多普勒效应公式，当声源与接收器之间有相对运动时，接收器接收到的频率 f 为

$$f=\frac{f_0(u+v_1\cos\alpha_1)}{(u-v_2\cos\alpha_2)} \tag{5.2.1}$$

式中，f_0 为声源发射频率，u 为声速，v_1 为接收器运动速率，α_1 为声源与接收器连线与接收器运动方向之间的夹角，v_2 为声源运动速率，α_2 为声源与接收器连线与声源运动方向之间的夹角.

若声源保持不动，运动物体上的接收器沿声源与接收器连线方向以速度 v 运动，则从(5.2.1)式可得接收器接收到的频率应为

$$f = f_0\left(1+\frac{v}{u}\right) \tag{5.2.2}$$

当接收器向着声源运动时，v 取正，反之取负.

若 f_0 保持不变，以光电门测量物体的运动速度，并由仪器对接收器接收到的频率自动计数，根据(5.2.2)式，作 f-v 关系图可直观验证多普勒效应. 由实验点作直线，其斜率应为 $k=f_0/u$，由此可计算出声速 $u=f_0/k$.

由(5.2.2)式可解出

$$v = u(f/f_0-1) \tag{5.2.3}$$

若已知声速 u 及声源频率 f_0，通过设置使仪器以某种时间间隔对接收器接收到的频率 f 采样计数，由微处理器按(5.2.3)式计算出接收器运动速度，由显示屏显示 v-t 关系图，或调阅有关测量数据，即可得出物体在运动过程中的速度变化情况，进而对物体运动状况及规律进行研究.

【实验内容】

1. 验证多普勒效应

在多普勒效应实验仪上，根据仪器菜单及提示，使运动小车以不同速度通过光电门，仪器自动记录小车运动速度与接收频率，完成测量后，仪器根据测量数据自动作 f-v 图形，并显示与存储测量数据，用线性回归法计算 f-v 关系图的斜率 k，由 k 计算声速 u，并与标准值比较(由 $u_0=331(1+t/273)^{1/2}(\mathrm{m\cdot s^{-1}})$计算，$t$ 表示室温). 实验装置如图 5.2.1 所示.

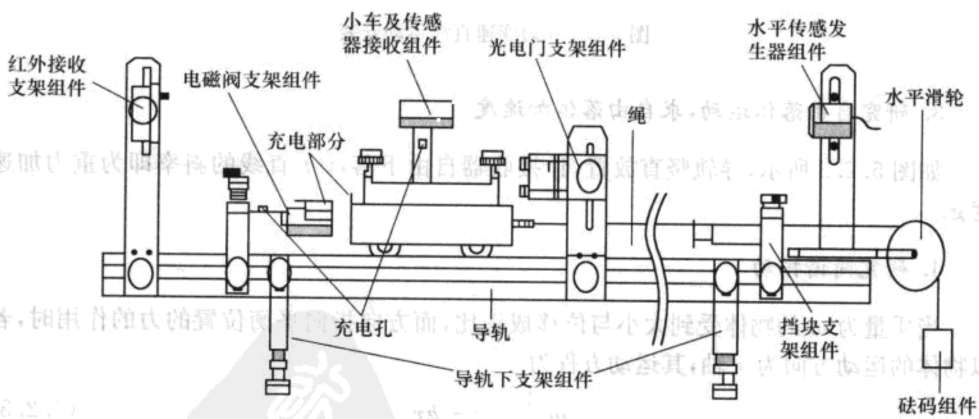


图 5.2.1　多普勒效应验证实验

2. 研究匀变速直线运动，验证牛顿第二定律 $F=ma$

质量为 M 的垂直运动部件与质量为 m 的砝码托及砝码悬挂于滑轮的两端，测量前

砝码托吸在电磁铁上，测量时电磁铁释放砝码，系统在外力作用下加速运动. 运动系统的总质量为 $M+m$，所受合外力为 $(M-m)g$（滑轮转动惯量与摩擦力忽略不计）.

根据牛顿第二定律，系统的加速度应为

$$a=\frac{(M-m)g}{(M+m)} \tag{5.2.4}$$

用天平称量垂直运动部件，砝码托及砝码质量，每次取不同质量的砝码放于砝码托上，记录每次实验对应的 m. 实验时仪器的安装如图 5.2.2 所示，由记录的 t，v 数据求得 v-t 直线的斜率即为此次实验的加速度 a.

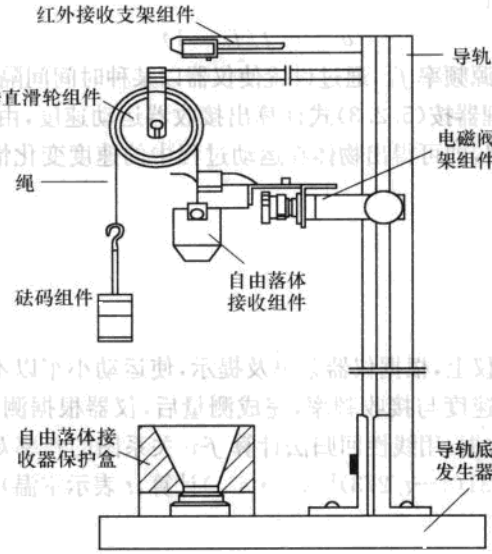


图 5.2.2　匀变速直线运动安装

3. *研究自由落体运动，求自由落体加速度*

如图 5.2.3 所示，导轨竖直放置，让接收器自由下落，v-t 直线的斜率即为重力加速度 g.

4. *研究简谐振动*

当质量为 m 的物体受到大小与位移成正比，而方向指向平衡位置的力的作用时，若以物体的运动方向为 x 轴，其运动方程为

$$m\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}=-kx \tag{5.2.5}$$

由(5.2.5)式描述的运动称为简谐振动，当初始条件为 $t=0$ 时，$x=-A_0$，$v=\mathrm{d}x/\mathrm{d}t=0$，则(5.2.5)式的解为

$$x=-A_0\cos\omega_0 t \tag{5.2.6}$$

将(5.2.6)式对时间求导，可得速度方程

$$v = \omega_0 A_0 \sin\omega_0 t \tag{5.2.7}$$

由(5.2.6)式、(5.2.7)式可知物体做简谐振动时，位移和速度都随时间做周期变化，式中 $\omega_0 = (k \cdot m^{-1})^{1/2}$ 为振动的角频率.

导轨竖直放置，接收器一端被弹簧拉住，由 v-t 关系图可研究简振动的运动学特征及简谐振动的基本参数如 ω, A, m, k 等，其中 ω 为小车的振动圆频率，A 为小车的振动位移幅度，m 为小车的质量，k 为弹簧的劲度系数.

测量时仪器的安装如图 5.2.4 所示，将弹簧通过一段细线悬挂于电磁铁上方的挂钩孔中，垂直运动超声接收器的尾翼悬挂在弹簧上，若忽略空气阻力，根据胡克定律，作用力与位移成正比，悬挂在弹簧上的物体应做简谐振动.

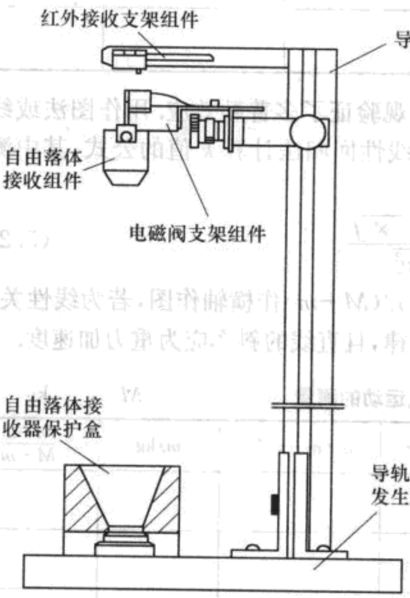


图 5.2.3　自由落体运动安装

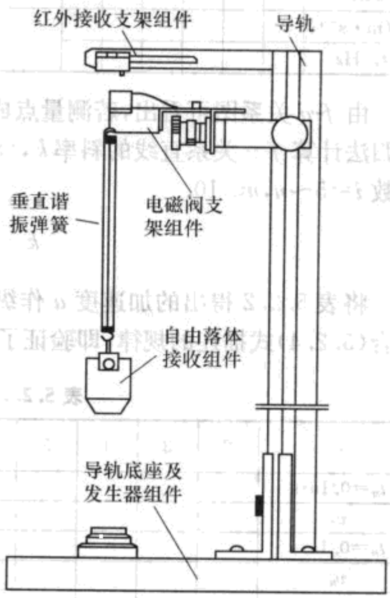


图 5.2.4　垂直谐振安装示意

5. 研究阻尼振动

导轨水平放置，用两根弹簧拉着小车，用于拉动小车使之有一初始位移，放手后小车即做阻尼简谐振动，得到 v-t 关系曲线图.

6. 其他变速运动的测量

要求学生自主的对一些复杂的运动进行研究，对理论上难于定量的因素进行分析，并得出自己的结论(如研究摩擦力与运动速度的关系，或与摩擦介质的关系).

【数据处理】

数据表格原则上自己设计(表 5.2.1～表 5.2.4 仅作参考)，必须按照常用数据处理

方法，采用列表法、图示图解法和直线拟合法.

基本要求：

(1) 采样数 8～150 个；

(2) 采样间隔 35～100ms；

(3) 超声换能器谐振频率 39 000～41 000Hz；

(4) 测量精度：自由落体加速度优于 5%，测量声速优于 5%.

表 5.2.1 多普勒效应的验证与声速的测量 $f_0=$____ Hz

测量数据							直线斜率 k/m^{-1}	声速测量值 $u=f_0/k/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	声速理论值 $u_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	百分误差 $(u-u_0)/u_0$
次数	1	2	3	4	5	6				
$v_n/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$										
f_n/Hz										

由 f-v 关系图可看出，若测量点成直线，即直观验证了多普勒效应. 用作图法或线性回归法计算 f-v 关系直线的斜率 k，(5.2.8)式为线性回归法计算 k 值的公式，其中测量次数 $i=5\sim n, n\leqslant 10$.

$$k=\frac{\overline{v_i}\times\overline{f_i}-\overline{v_i\times f_i}}{\overline{v_i}^2-\overline{v_i^2}} \tag{5.2.8}$$

将表 5.2.2 得出的加速度 a 作纵轴，$(M-m)/(M+m)$ 作横轴作图，若为线性关系，符合(5.2.4)式描述的规律，即验证了牛顿第二定律，且直线的斜率应为重力加速度.

表 5.2.2 匀变速直线运动的测量 $M=$ kg

n	2	3	4	5	6	7	8	$a/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	m/kg	$\frac{M-m}{M+m}$
$t_n=0.1n/\text{s}$										
v_n										
$t_n=0.1n/\text{s}$										
v_n										
$t_n=0.1n/\text{s}$										
v_n										
$t_n=0.1n/\text{s}$										
v_n										

表 5.2.3 自由落体运动的测量

n	2	3	4	5	6	7	8	$g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	平均值 $g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	理论值 $g_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	百分误差 $(g-g_0)/g_0$
$t_n=0.05n/\text{s}$											
v_n											
$t_n=0.05n/\text{s}$											
v_n											
$t_n=0.05n/\text{s}$											
v_n											
$t_n=0.05n/\text{s}$											
v_n											

表 5.2.4　简谐振动的测量

M/kg	Δx/(m)	$k=mg/\Delta x$ /(kg · s^{-2})	$\omega_0=(k/m)^{1/2}$ /(s^{-1})	N_{1max}	N_{11max}	$T=0.01(N_{11max}-N_{1max})$/(s)	$\omega=2\pi/T$/(s)	百分误差 $(\omega-\omega_0)/\omega_0$

【注意事项】

(1) 实验前应仔细阅读仪器说明书.

(2) 在超声应用中,需要将发生器与接收器的频率匹配,并将驱动频率调到谐振频率,才能有效的发射与接收超声波.

(3) 调谐及实验进行时,须保证超声发生器和接收器之间无任何阻挡物.

实验 5.3　AD590 集成温度传感器性能及应用研究

集成温度传感器是将作为感温器件的晶体管及其外围电路集成在同一芯片上的集成化温度传感器. 这类传感器已广泛用于科研、工业和家用电器等方面的温度测量和控制. 目前,集成温度传感器已广泛用于−50～+150℃温度范围内的温度检测、控制和补偿等. 集成温度传感器按输出量不同可分为电压型和电流型两大类. 电压型传感器的特点是直接输出电压,电压只随温度变化,且输出阻抗低,易于和控制电路接口,可用于温度检测等,如 LM135、LM235、LM335 系列等. 而电流型传感器的特点是,在一定温度下,它相当于一个恒流源,输出电流与绝对温度成正比 . 因此,它具有不易受接触电阻和引线电阻的影响和电压噪声的干扰,且准确度更高. 例如,AD590 电流型集成温度传感器,只需要单电源(+4～+30V),即可实现温度到电流的线性变换,然后在终端使用一只取样电阻即可实现电流到电压的转换,使用十分方便.

【实验目的】

(1) 测量 AD590 温度传感器的温度特性,检验 AD590 的线性性质.

(2) 利用 AD590 集成温度传感器,设计制作测温范围 0～75℃的数字温度计.

(3) 测量 AD590 传感器的输出电流和工作电压关系.

【实验器材】

AD590 集成温度传感器、电压表、变阻器、导线、数字电压表、温度计或数显温度加热设备等.

【实验原理】

AD590 集成电路温度传感器由多个参数相同的三极管和电阻组成. 该器件的两端当加有某一定直流工作电压时,它的输出电流与温度满足如下关系:

$$I = B\theta + A \tag{5.3.1}$$

式中,I 为其输出电流,单位 μA,θ 为摄氏温度,B 为斜率(一般 AD590 的 $B=1\mu A \cdot ℃^{-1}$,

即如果该温度传感器的温度升高或降低1℃，那么传感器的输出电流增加或减少 1μA），A 为摄氏零度时的电流值，其值恰好与冰点的热力学温度 273K 相对应. 利用 AD590 集成电路温度传感器的上述特性，可以制作各种用途的温度计. 采用非平衡电桥绕路，制作一台数字式摄氏温度计，即 AD590 器件在 0℃时，数字电压显示值为“0”，而当 AD590 器件处于 θ℃时，数字电压表显示值为“θ”.

【实验内容】

(1) 测量温度特性——确定工作温度范围.

按图 5.3.1 连接好线路（AD590 的正负极不能接错）. 测量 AD590 集成电路温度传感器的电流 I 与温度 θ 的关系. 取样电阻 R 的值为 1000Ω. 把实验数据用最小二乘法进行拟合，描绘 I-θ 温度特性曲线，求出曲线斜率 B、截距 A 及相关系数 r.

(2) 利用 AD590 集成温度传感器，自己设计制作测温范围 0～75℃的数字温度计.

要求设计电路图，分析电路工作原理，自己设计一个用 AD590 精确测量 0～75℃范围内温度的电路，而且达到使数字电压表的示数正好是摄氏温度的读数.

(3) 按图 5.3.2 所示连接电路，测量集成温度传感器 AD590 在某恒定温度时的伏安特性曲线，求出 AD590 在某温度时线性使用的最小电压.

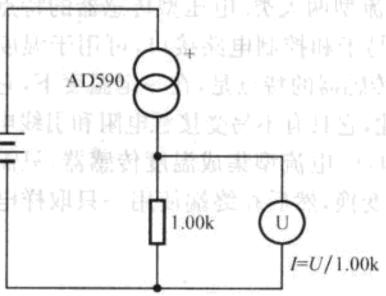


图 5.3.1　测量 AD590 温度特性的电路图

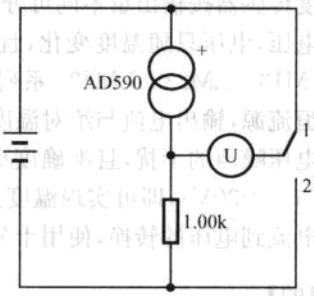


图 5.3.2　测量 AD590 伏安特性的电路图

【注意事项】

(1) AD590 集成温度传感器的正负极不能接错.

(2) AD590 集成温度传感器不可直接放入水中或冰水混合物中测量温度，为防止极间短路，应将其置入一端封闭加有少量油的薄玻璃试管中.

实验 5.4　传感器的原理与应用

能够感受到被测量并按照一定的规律将被测量转换成输出信号的器件或装置称为传感器，传感器通常由敏感元件以及转换器件组成. 其中，敏感元件是指传感器中能直接感受或响应的被测量的部分；转换元件是指传感器中能将敏感元件感受或响应的被测量量转换成适于传输或测量的电信号部分. 传感器是感知、获取、检测和转换信息的窗口，处于

研究对象与传输处理系统的接口位置，被喻为计算机实现电脑智能化的"五官"，因此，传感器是实现信息化的主要技术基础.

本实验要求利用CYS系列传感器系统实验仪完成金属温度传感器测温、光纤位移传感器测量位移、霍尔式传感器的直流激励特性以及在电子秤应用方面等内容. 通过这些实验了解各类传感器的构成及测量电路原理，加深对传感器的原理和应用的认识，拓宽知识面，逐步提高对传感器的开发应用能力.

【仪器介绍】

CSY传感器系统实验仪集被测体、各种传感器、信号激励源、处理电路和显示器于一体，组成一个完整的测试系统. 它能完成包括光、磁、电、温度、位移、振动、转速等方面的测试实验.

实验仪主要由实验工作台、处理电路、信号与显示电路三部分组成.

1. 实验工作台部分

工作台左边是一副平行式悬臂梁，梁上装有应变式、热敏式、PN结温度式、热电式和压电加速度五种传感器.

(1) **应变式**. 平行梁上梁的上表面和下梁的下表面对应地贴有八片应变片，受力工作片分别用符号↕和↕表示，其中六片为金属箔式片(BHF-350). 横向所贴的两片为温度补偿片，用符号↔和↔表示. 片上标有"BY"字样的为半导体式应变片，灵敏系数130.

(2) **热电式**(热电偶). 串接工作的两个铜—康铜热电偶分别装在上、下梁表面，冷端温度为环境温度.

(3) **热敏式**. 上梁表面装有玻璃珠状的半导体热敏电阻MF-51，负温度系数. 25℃时阻值为8～10K.

(4) **PN结温度式**. 是根据半导体PN结温度特性所制成的具有良好线性范围的温度传感器，敏感面为顶端.

(5) **压电加速度式**. 位于悬臂梁右部，由PZT-5双压电晶片，铜质量块和压簧组成，装在透明外壳中.

工作台右边是由装于机内的另一副平行梁带动的圆盘式工作台. 圆盘周围安装有(依逆时针方向)电感式(差动变压器)、电容式、磁电式、霍尔式、电涡流式五种传感器.

(1) **电感式**(差动变压器). 由初级线圈Li和两个次级线圈L绕制而成的空心线圈，圆柱形铁氧体铁芯置于线圈中间. 测量范围＞10mm.

(2) **电容式**. 由装于圆盘上的一组动片和装于支架上的两组定片组成平行变面积式差动电容，线性范围≥3mm.

(3) **磁电式**. 由一组线圈和动铁(永久磁钢)组成，灵敏度 $0.4V\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$.

(4) **霍尔式**. 半导体霍尔片置于两个半环形永久磁钢形成的梯度磁场中，线性范围≥3mm，直流激励电压≤2V，交流激励信号 $U_{P-P}\leq 5V$.

(5) **电涡流式**. 是多股漆包线绕制的扁平线圈与金属涡流片组成的传感器，线性范围大于1mm.

光电式传感器装于电机侧旁.

两副平行式悬臂梁顶端均装有置于激振线圈内的永久磁钢,右边圆盘式工作台由"激振Ⅰ"带动,左边平行式悬臂梁由"激振Ⅱ"带动.

为进行温度实验,左边悬臂梁之间装有一组电加热器,工作时能获得高于环境温度30℃左右的升温.

以上传感器以及加热器、激振线圈的引线端均位于仪器下部面板最上端一排.

实验工作台上还装有一组测速电机和控制、调速开关.

两只测微仪分别装在左、右两边的支架上.

2. 信号及显示部分(位于仪器上部面板)

低频振荡器 1～30Hz 输出连续可调,U_{P-P}值 20V,最大输出电流 0.5A,U_i 端插口可提供用作电流放大器. U_i 端 3.5mm 耳机插座静合接点的正常接触是低频输出的条件,无低频信号无输出,则可能是静合接点分开,如遇此情况要打开面板,调节 U_i 端插口静合接点接触良好.

音频振荡器 0.4～10kHz 输出连续可调,U_{P-P}值 20V,180°、0°为反相输出,Lv 端最大功率输出 0.5A.

直流稳压电源 ±15V. 提供仪器电路工作电源和温度实验时的加热电源,最大输出1A. ±2～±10V,挡距 2V,分五挡输出,提供直流信号源,最大输出电流 1A.

数字式电压/频率表 3½位显示,分 2V、20V、2kHz、20kHz 四挡,灵敏度≥50mV,频率显示 5Hz～20kHz.

指针式直流毫伏表 测量范围 500mV、50mV、5mV 三挡,精度 2.5%.

3. 处理电路(位于仪器下部面板)

电桥 用于组成应变电桥,面板上虚线所示电阻为虚设,仅为组桥提供插座. R_1、R_2、R_3 为 350Ω 标准电阻,W_D为直流调节电位器,W_A为交流调节电位器. W_D电位器中心抽头串接的为防短路电阻,W_A 电位器中心抽头串接的为隔直电容.

差动放大器 增益可调比例直流放大器,可接成同相、反相、差动结构,增益 1～100 倍.

光电变换器 提供红外发射、接收、稳幅、变换,输出模拟信号电压与频率变换方波信号. 四芯航空插座上装有光电转换装置和两根多模光纤(一根接收,一根发射)组成的光强型光纤传感器.

电容变换器 由高频振荡、放大和双 T 电桥组成.

移相器 允许输入电压 $20U_{P-P}$,移相范围±40°(随频率有所变化).

相敏检波器 由极性反转电路构成,所需最小参考电压 $0.5U_{P-P}$,允许最大输入电压 $20U_{P-P}$.

电荷放大器 为电容反馈式放大器,用于放大压电加速度传感器输出的电荷信号.

电压放大器 增益为 5 倍的高阻放大器.

涡流变换器 变频式调幅变换电路,传感器线圈是三点式振荡电路中的一个元件.

温度变换器 根据输入端热敏电阻值及 PN 结温度传感器信号变化输出电压信号相

应变化的变换电路.

低通滤波器　由 50Hz 谐波器和 RC 滤波器组成. 转折频率为 35Hz 左右.

【注意事项】

(1) 对从电源、振荡器引出的线要特别注意，不要接触机壳造成短路，也不能将这些引线到处乱插，否则，很可能引起仪器损坏.

(2) 仪器工作时需良好的接地，以减小干扰信号，并尽量远离电磁干扰源. 指针式毫伏表工作前需对地短路调零，取掉短路线后指针有所偏转是正常现象，不影响测试.

(3) 要在确认接线无误的情况下开启电源，要尽量避免电源短路情况的发生，实验工作台上各传感器部分如位置不太正确可松动调节螺丝稍作调整，以按下振动梁松手，各部分能随梁上下振动而无碰擦为宜.

(4) 仪器下部面板左下角处的开关控制处理电路的±15V 工作电源，进行实验时请勿关掉. 为保证仪器正常工作，严禁±15V 电源间的相互短路，建议平时将此两插口封住.

(5) 叠插式插头应避免拉扯，以防插头折断.

(6) 用激振器时不要将低频振荡器的激励信号开得太大，以免梁的振幅过大而损坏.

(7) 音频振荡器接低阻负载(小于 100Ω)时，应从 Lv 口输出，不能从另两个电压输出插口输出.

5.4.1　金属温度传感器的标定与测温

【实验原理】

热电偶的基本工作原理是热电效应：当其热端和冷端的温度不同时，即产生热电动势，通过测量此电动势 E 即可知道两端温差，如果某一端温度固定(一般固定为室温或者为 0℃)，则另一端温度就可知，从而实现温度的测量. 本实验用铜-康铜热电偶.

设 T_0 为 0℃，T_1 为室温，达到热平衡时，加热端温度为 T，则有

$$E(T,T_0)=E(T,T_1)+E(T_1,T_0)$$

通过实验可测得 $E(T,T_1)$，而若测出室温，则 $E(T_1,T_0)$ 可由分度表查得，于是可算得 $E(T,T_0)$，再通过分度表即可算得热端温度 T.

【实验内容】

(1) 按图 5.4.1 连接线路，差动放大器两输入端接入热电偶，打开电源，差动放大器增益设为最大，调节调零电位器，使差放增益为零.

(2) 打开加热器，差动放大器输出如有微小变化，马上调节调零电位器再度调零.

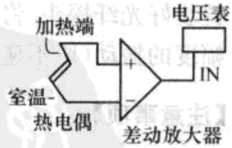


图 5.4.1　测温实验连接图

(3) 随加热器温度上升，观察差动放大器输出电压的变化，待加热温度不再上升时，记录电压表读数.

(4) 测量差动放大器放大倍数.

(5) 查阅铜-康铜热电偶分度表，求出加热温度 t.

5.4.2 用光纤位移传感器测量位移

【实验原理】

反射式光纤传感器工作原理如图 5.4.2 所示.

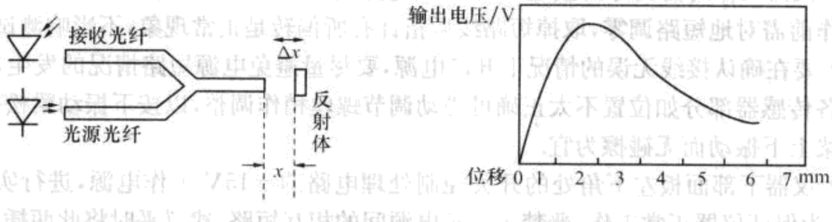


图 5.4.2 反射式光纤位移传感器原理图及输出特性曲线

光纤采用 Y 型结构，两束多模光纤合并于一端组成光纤探头，一束作为接收，另一束为光源发射，红外二极管发出的红外光经光源光纤照射至被测物，由被测物反射的光信号经接收光纤传输至光电转换器件转换为电信号，反射光的强弱表示了反射物与光纤探头的距离，通过对光强的检测就可得知位置量的变化.

【实验内容】

(1) 观察光纤结构：本实验仪所配的光纤探头为半圆型结构，由数百根导光纤维组成，一半为光源光纤，一半为接收光纤.

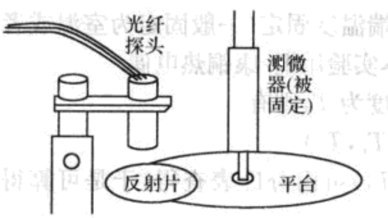


图 5.4.3 光纤位移传感器测量实验图

(2) 将原装在电涡流线圈支架上的电涡流线圈取下，装上光纤探头，探头垂直对准反射片中央(镀铬圆铁片)，装上螺旋测微仪支架，以带动反射镜片移动，如图 5.4.3 所示.

(3) 振动台上装上测微头，开启电源，光电变换器 U_0 端接电压表. 旋动测微头，带动平台，使光纤探头端面紧贴反射镜面，此时 U_0 输出为最小. 然后旋动测微头，使反射镜面离开探头，每隔 0.25mm 记录下一个 U_0 值，作出 U-x 曲线.

(4) 振动实验：将测微头移开，振动台处于自由状态，根据 U-x 曲线，选取前坡中点位置装好光纤探头. 将低频振荡器输出接“激振Ⅰ”调节激振频率和幅度，使振动台保持适当幅度的振动(以不碰到光纤探头为宜)，用电压/频率表读出振动频率.

【注意事项】

(1) 光纤请勿弯折成锐角，以免造成断裂，端面尤要注意保护，否则会造成灵敏度下降.

(2) 每台仪器的光电转换器(包括光纤)与转换电路都是单独调配的,请注意与仪器编号配对使用.

(3) 实验时注意增益调节,输出最大信号以2V左右为宜,避免过强的背景光照射.

5.4.3　霍尔式传感器的直流激励特性研究

【实验原理】

霍尔式传感器是一种基于霍尔效应的传感器.本实验所用的霍尔传感器,由两个产生梯度磁场的环形磁钢和霍尔元件组成.霍尔元件通以恒定电流时,霍尔电势的大小正比于磁场强度,当霍尔元件在梯度磁场中上、下移动时,输出的霍尔电势 E 取决于其在磁场中的位移量,所以测得霍尔电势的大小便可获知霍尔元件的静位移.

【实验内容】

(1) 按图5.4.4接线,确认霍尔元件直流激励电压为2V,另一激励端接地,差动放大器增益适度(即在梯度场边缘使其输出达到10V左右).

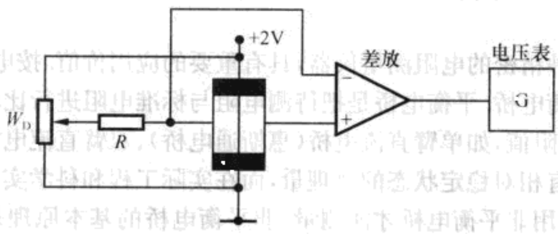


图5.4.4　霍尔传感器实验连接图

(2) 用螺旋测微仪调节振动平台使霍尔元件置于梯度磁场中间,开启电源,并调节电桥直流电位器 W_D,使输出为零.上下移动振动台,使差放正负电压输出对称.

(3) 从中点开始,调节螺旋测微仪,上下移动霍尔元件各3.5mm,每变化0.5mm读取相应的电压值,作出 E-x 曲线,求得灵敏度和线性工作范围.

【注意事项】

直流激励电压只能是2V,不能接其他电压值,否则霍尔元件会烧坏.

5.4.4　霍尔传感器的应用——电子秤

【实验原理】

由实验5.4.3知,霍尔电压与霍尔片的静位移成正比,若弹性载物平台遵从胡克定律,那么平台上所放砝码的质量将与霍尔片的位移成正比,也就会与霍尔电压成正比.因此,若能知道平台上物品质量与霍尔电压的比例关系,就能够利用霍尔电压计算出平台上

某一物品的质量.

【实验内容】

(1) 在上述实验(霍尔传感器的直流激励特性研究)的基础上,保持设备及接线不变,取下测微头,以振动台作为称重平台,逐步放上砝码 $W_1,W_2,\cdots,W_n$,依次记下电压表读数 $V_1,V_2,\cdots V_n$,作出 U-W 曲线.

(2) 用电子天平依次测量砝码的质量($m_1,m_2,\cdots m_n$).

(3) 移走称重砝码,在平台上放置一未知重量的物品,根据电压表读数 U_x 由 U-W 曲线求得其重量 W_x.

(4) 用电子天平直接测量所称重物的质量,与间接测量结果进行对比.

【注意事项】

(1) 称重时,霍尔式传感器应工作在梯度磁场中,所以砝码和被称重物都不应太重.

(2) 砝码应置于平台的中间部分,避免平台倾斜.

实验 5.5　非平衡电桥及应用

直流电桥是一种精密的电阻测量仪器,具有重要的应用价值.按电桥的测量方式可分为平衡电桥和非平衡电桥.平衡电桥是把待测电阻与标准电阻进行比较,通过调节电桥平衡,从而测得待测电阻值,如单臂直流电桥(惠斯通电桥)、双臂直流电桥(开尔文电桥).它们只能用于测量具有相对稳定状态的物理量,而在实际工程和科学实验中,很多物理量是连续变化的,只能采用非平衡电桥才能测量.非平衡电桥的基本原理是,通过桥式电路来测量电阻,根据电桥输出的不平衡电压,再进行运算处理,从而得到引起电阻变化的其他物理量,如温度、压力、形变等.

【实验目的】

(1) 掌握用非平衡直流电桥电压输出方法测量电阻的基本原理和操作方法.

(2) 初步掌握非平衡电桥的设计方法;学习与掌握根据不同待测电阻值选择桥式.

【实验原理】

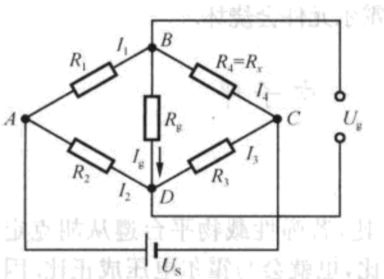


图 5.5.1　非平衡电桥

非平衡电桥原理如图 5.5.1 所示:B、D 之间为一负载电阻 R_g、只要测量电桥输出 U_g、I_g,即可得到 R_x 值.

1. 电桥分类

(1) 等臂电桥,$R_1=R_2=R_3=R_4$.

(2) 输出对称电桥,也称为卧式电桥,$R_1=R_4=R$,$R_2=R_3=R'$,且 $R\neq R'$.

(3) 电源对称电桥，也称为立式电桥，$R_1=R_2=R$，$R_3=R_4=R'$，且 $R\neq R'$.

2. 输出电压

当负载电阻 $R_g\to\infty$，即电桥输出处于开路状态时，$I_g=0$，仅有电压输出，用 U_0 表示，若后面接数字电压表或高输入阻抗放大器时，则属此种情况.

根据分压原理，ABC 半桥的电压降为 U_S，通过 R_1、R_4 两臂的电流为

$$I_1=I_4=\frac{U_S}{R_1+R_2} \tag{5.5.1}$$

则 R_4 上之电压降为

$$U_{BC}=\frac{R_4}{R_1+R_4}\cdot U_S \tag{5.5.2}$$

同理 R_3 上的电压降为

$$U_{DC}=\frac{R_3}{R_2+R_3}\cdot U_S \tag{5.5.3}$$

输出电压 U_0 为 U_{BC} 与 U_{DC} 之差

$$U_0=U_{BC}-U_{DC}=\frac{R_2R_4-R_1R_3}{(R_1+R_4)(R_2+R_3)}\cdot U_S \tag{5.5.4}$$

满足条件

$$R_1R_3=R_2R_4 \quad 或 \quad \frac{R_1}{R_2}=\frac{R_4}{R_3} \tag{5.5.5}$$

则电桥输出 $U_0=0$，即电桥处于平衡状态.(5.5.5)式就称为电桥的平衡条件.为了测量的准确性，在测量的起始点，电桥必须调至平衡，称为预调平衡.这样输出只与某一臂电阻变化有关.

若 R_1、R_2、R_3 固定，R_4 为温度的函数 $R_t=R(t)=R_x$，则当温度 $t\to t+\Delta t$ 时，$R_4\to R_4+\Delta R$，因电桥不平衡而产生的电压输出为

$$U_0(t)=\frac{R_2R_4+R_2\Delta R-R_1R_3}{(R_1+R_4)(R_2+R_3)+\Delta R(R_2+R_3)}\cdot U_S \tag{5.5.6}$$

当电阻增量 ΔR 较小时，即 $\Delta R\ll R_i(i=1,2,3,4)$，则(5.5.6)式分母中含有 ΔR 之项可以略去，室温 t_0 时预调平衡，则(5.5.6)式变为

$$U_0(t)=\frac{R_2\Delta R}{(R_1+R_4)(R_2+R_3)}\cdot U_S \tag{5.5.7}$$

由此可得三种电桥的输出为

(1) 等臂电桥

$$U_0(t)=\frac{U_S}{4}\cdot\frac{\Delta R}{R}\cdot\frac{1}{1+\frac{1}{2}\cdot\frac{\Delta R}{R}}=\frac{U_S}{4}\cdot\frac{\Delta R}{R} \tag{5.5.8}$$

(2) 卧式电桥

$$U_0(t)=\frac{U_S}{4}\cdot\frac{\Delta R}{R}\cdot\frac{1}{1+\frac{1}{2}\cdot\frac{\Delta R}{R}}=\frac{U_S}{4}\cdot\frac{\Delta R}{R} \tag{5.5.9}$$

(3) 立式电桥

$$U_0(t)=U_S\cdot\frac{RR'}{(R+R')}\cdot\frac{\Delta R}{R}\cdot\frac{1}{1+\frac{1}{2}\cdot\frac{\Delta R}{R}}=U_S\cdot\frac{RR'}{(R+R')}\cdot\frac{\Delta R}{R}\tag{5.5.10}$$

显然,当 $\Delta R\ll R_i$ 时,三种电桥的输出均与 $\Delta R/R$ 成线性比例关系.特别要强调的一点是公式(5.5.7)~(5.5.12)式中的 R 和 R',均为预调平衡后的电阻值.测量了输出电压后,通过上述公式运算得到 $\Delta R(x)/R$ 或 $\Delta R(t)$,从而求得 $R(t)=R+\Delta R$.

由(5.5.10)式~(5.5.12)式可知,在 R、ΔR 相同的情况下,等臂电桥、卧式电桥输出电压比立式电桥的输出电压高,因此灵敏度也高,但立式电桥测量范围大,可以通过选择 R、R' 来扩大测量范围,R、R' 差距越大,测量范围也越大.

3. 输出功率

当负载电阻 R_g 较小时,电桥不仅有电压输出 U_g 也有电流输出 I_g,也就是说有功率输出此种电桥也称为功率桥,有必要求出 I_g 和 U_g.功率桥可以表示为如图 5.5.2(a)所示电路.应用有源端口网络定理,功率桥可以简化为如图 5.5.2(b)所示电路.U_{BD} 为 BD 之间的开路电压,由(5.5.4)式表示图 5.5.2(b)中的 R'' 是有源端口网络等值支路中的电阻,其值等于该网络入端电阻 R_r,见图 5.5.2(c).

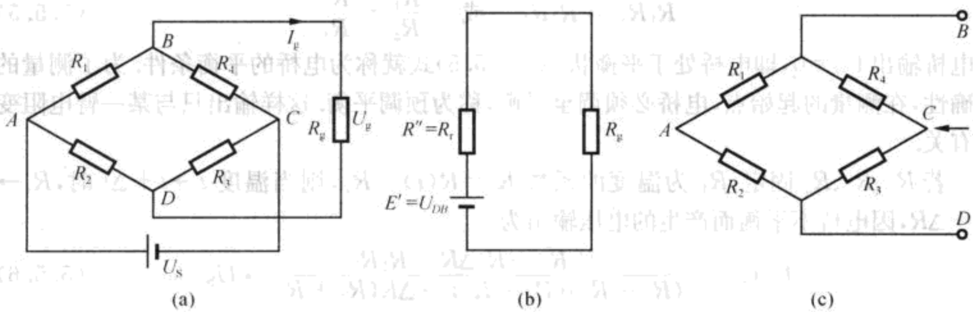


图 5.5.2　非平衡电桥功率输出电路

$$P''=P_p=\frac{P_1P_4}{P_1+P_4}+\frac{P_2P_3}{P_2+P_3}\tag{5.5.11}$$

由图 5.5.2(b)可知,流经负载 R_g 电流为

$$I_g=\frac{U_{BD}}{R''+R_g}=\frac{R_2R_4-R_1R_3}{R_g(R_1+R_4)(R_2+R_3)+R_1R_4(R_2+R_3)+R_2R_3(R_1+R_4)}\cdot U_S\tag{5.5.12}$$

当 $I_g=0$ 时,$R_2R_4-R_1R_3=0$,即

$$\frac{R_1}{R_2}=\frac{R_4}{R_3}\tag{5.5.13}$$

这是功率桥的平衡条件,与(5.5.5)式一致.也就是说,功率输出与电压输出的平衡条件是一致的.

最大功率输出时，电桥的灵敏度最高. 当电桥的负载电阻 R_g 等于输出电阻(电源内阻 R_r)即阻抗匹配时

$$R_g = R_r = \frac{R_1R_4}{R_1+R_4} + \frac{R_2R_3}{R_2+R_3} \tag{5.5.14}$$

则电桥输出功率最大. 此时电桥的输出电流由(5.5.12)式得

$$I_g = \frac{R_2R_4 - R_1R_3}{R_1R_4(R_2+R_3)+R_2R_3(R_1+R_4)} \cdot \frac{U_S}{2} \tag{5.5.15}$$

输出电压为

$$U_g = I_gR_g = \frac{R_2R_4 - R_1R_3}{(R_1+R_4)(R_2+R_3)} \cdot \frac{U_S}{2} \tag{5.5.16}$$

当桥臂 R_4 的电阻有增量 ΔR 时，我们可以求得三种桥式的电流、电压和功率变化. 测量时都需要预调平衡，平衡时 I_g、U_g 均为 0，电流、电压、功率变化都是相对于平衡状态而言的.

当电阻增量 ΔR 较小，即满足 $\Delta R \ll R$ 时，不同桥式的三组公式分别为

(1) 等臂电桥

$$\Delta I_g = \frac{U_S}{8R} \cdot \left(\frac{\Delta R}{R}\right) \cdot \frac{1}{1+\frac{3}{4}\cdot\frac{\Delta R}{R}} = \frac{U_S}{8R} \cdot \left(\frac{\Delta R}{R}\right) \tag{5.5.17}$$

$$\Delta U_g = \frac{U_S}{8} \cdot \left(\frac{\Delta R}{R}\right) \cdot \frac{1}{1+\frac{\Delta R}{2R}} = \frac{U_S}{8} \cdot \left(\frac{\Delta R}{R}\right) \tag{5.5.18}$$

$$\Delta P_g = \frac{U_S^2}{64R} \cdot \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 \cdot \frac{1}{\left(1+\frac{3\Delta R}{4R}\right)\left(1+\frac{\Delta R}{2R}\right)} = \frac{U_S^2}{64R} \cdot \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 \tag{5.5.19}$$

(2) 卧式电桥

$$\Delta I_g = \frac{U_S}{4(R+R')} \cdot \left(\frac{\Delta R}{R}\right) \cdot \frac{1}{1+\frac{2R+R'}{2(R+R')}\cdot\frac{\Delta R}{R}} = \frac{U_S}{4(R+R')} \cdot \left(\frac{\Delta R}{R}\right) \tag{5.5.20}$$

$$\Delta U_g = \frac{U_S}{8R} \cdot \left(\frac{\Delta R}{R}\right) \cdot \frac{1}{1+\frac{\Delta R}{2R}} = \frac{U_S}{8} \cdot \left(\frac{\Delta R}{R}\right) \tag{5.5.21}$$

$$\Delta P_g = \frac{U_S^2}{32R(R+R')} \cdot \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 \cdot \frac{1}{\left[1+\frac{2R+R'}{2(R+R')}\frac{\Delta R}{2R}\right]\left(1+\frac{\Delta R}{2R}\right)} = \frac{U_S^2}{32(R+R')} \cdot \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 \tag{5.5.22}$$

(3) 立式电桥

$$\Delta I_g = \frac{U_S}{4(R+R')} \cdot \left(\frac{\Delta R}{R}\right) \cdot \frac{1}{1+\frac{2R+R'}{2(R+R')}\cdot\frac{\Delta R}{R}} = \frac{U_S}{4(R+R')} \cdot \left(\frac{\Delta R}{R}\right) \tag{5.5.23}$$

$$\Delta U_g = \frac{U_S}{2}\cdot\left(\frac{RR'}{(R+R')^2}\right)\cdot\left(\frac{\Delta R}{R}\right)\cdot\frac{1}{1+\dfrac{\Delta R}{R+R}} = \frac{U_S}{2}\cdot\left(\frac{RR'}{(R+R')^2}\right)\cdot\left(\frac{\Delta R}{R}\right) \tag{5.5.24}$$

$$\begin{aligned}\Delta P_g &= \frac{U_S^2}{8}\cdot\frac{RR'}{(R+R')^3}\left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2\cdot\frac{1}{\left[1+\dfrac{2R+R'}{2(R+R')}\cdot\dfrac{\Delta R}{R}\right]\left(1+\dfrac{\Delta R}{R+R'}\right)}\\ &= \frac{U_S^2}{8}\cdot\frac{RR'}{(R+R')^3}\left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2\end{aligned} \tag{5.5.25}$$

由(5.5.17)式～(5.5.25)式可知，当 $\Delta R \ll R$ 时，三种电桥的电流、电压变化均与电阻变化 $\Delta R/R$ 成(线性)比例，这对于测量处理十分方便.

测量得到 ΔI_g 和 ΔU_g 后，再通过上述相关公式运算得到相应的 $\Delta R_I(t)$ 和 $\Delta R_U(t)$，运用

$$\Delta R(t) = U\sqrt{\Delta R_I(t)\cdot\Delta R_U(t)} \tag{5.5.26}$$

式得到 $\Delta R(t)$，同理可得到 $R(t)=R+\Delta R(t)$. 若采用功率表达公式，则先计算得到 ΔP_g. 直接从 ΔP_g，得到 $\Delta R(t)$.

【仪器介绍】

FQJ-Ⅲ型教学用非平衡直流电桥、DHW-2型温度传感实验装置.

1. FQJ-Ⅲ型非平衡直流电桥

FQJ-Ⅲ型非平衡直流电桥包括单臂直流电桥、双臂直流电桥、非平衡直流电桥. 面板示意图如图5.5.3所示. 平衡电桥、比率 k 值、非平衡电桥、电压输出及功率输出均通过功能转换开关来实现.

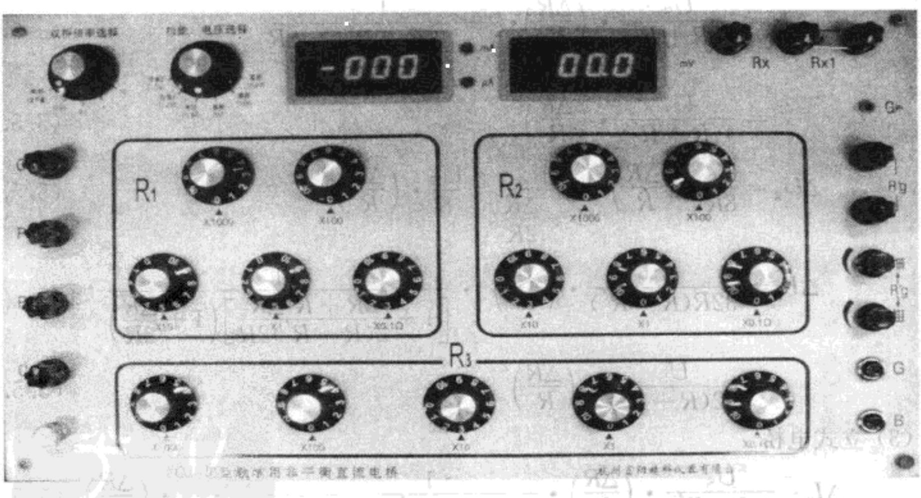


图 5.5.3　电桥面板

(1) 单臂电桥(惠斯通电桥),如图 5.5.4、图 5.5.5、表 5.5.1.

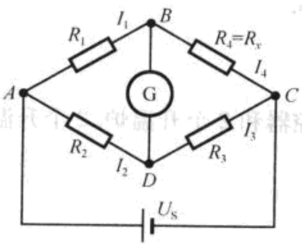


图 5.5.4　单桥原理图

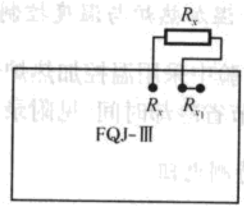


图 5.5.5　单桥的测量图

表 5.5.1　单桥

量程倍率	有效量程/Ω	准确度/%	电源电压/V
$\times10^{-3}$	1～11.11	2	5
$\times10^{-2}$	10～111.11	0.2	5
$\times10^{-1}$	100～1111.1	0.2	5
×1	1～11.111K	0.2	5
×10	10～11.11K	1	15
$\times10^{2}$	100～1111.1K	2	15
$\times10^{3}$	1～11.11IM	10	15

(2) 双臂电桥(开尔文电桥),如图 5.5.6、图 5.5.7、表 5.5.2.

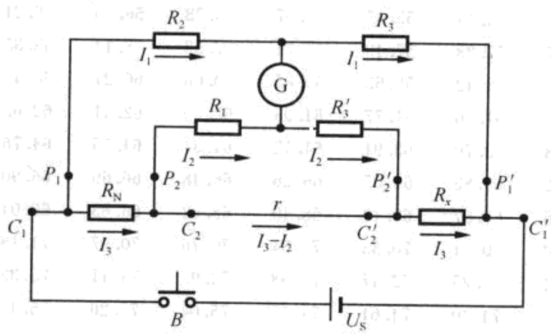


图 5.5.6　双桥原理图

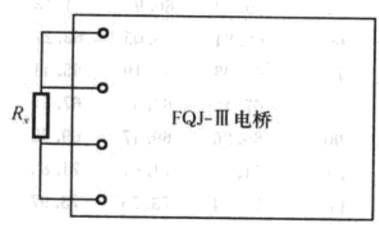


图 5.5.7　双桥的测量线路

表 5.5.2　双桥

量程倍率	测量上限/Ω	$R_1=R_2$/Ω	R_3 位置	分辨率/Ω	准确度/%	电源电压/V
×10	111.11	1000	1000	0.001	1	1.5
×1	11.111	1000	1000	0.0001	1	1.5
$\times10^{-1}$	1.1111	1000	1000	0.00001	1	1.5
$\times10^{-2}$	0.11111	1000	1000	0.00001	2	1.5

(3) 非平衡电桥. 非平衡测量原理见图 5. 5. 1, BD 之间为一负载电阻 R_g，只要测量电桥输出 U_g、I_g，不但可得到 R_x 值，还可求得输出功率.

2. 升温加热炉与温度控制器

本实验中采用温控加热炉升温. 它包含 1 个温控器和 2 个升温炉. 2 个升温炉可以交替升温，节省冷却时间(见附录).

3. 待测电阻

(1) 铜电阻 Cu50. 这是一个线性电阻. 具有正的温度系数，$R_t = R_0(1+\alpha t)$，R_0 为 $t=0$℃时的阻值. 其电阻-温度特性见表 5. 5. 3.

表 5. 5. 3 铜电阻 Cu50 的电阻-温度特性 $\alpha = 0.004280/℃$

温度/℃	电阻值/Ω									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
−50	39. 24									
−40	41. 40	41. 18	40. 97	40. 75	40. 54	40. 32	40. 10	39. 89	39. 67	39. 46
−30	43. 55	43. 34	43. 12	42. 91	42. 69	42. 48	42. 27	42. 05	41. 83	41. 61
−20	45. 70	45. 49	45. 27	45. 06	44. 84	44. 63	44. 41	42. 20	43. 98	43. 77
−10	47. 85	47. 64	47. 42	47. 21	46. 99	46. 78	46. 56	46. 35	46. 13	45. 92
−0	50. 00	49. 78	49. 57	49. 35	49. 14	48. 92	48. 71	48. 50	48. 28	48. 07
0	50. 00	50. 21	50. 43	50. 64	50. 86	51. 07	51. 28	51. 50	51. 81	51. 93
10	52. 14	52. 36	52. 57	52. 78	53. 00	53. 21	53. 43	53. 64	53. 86	54. 07
20	54. 28	54. 50	54. 71	54. 92	55. 14	55. 35	55. 57	55. 78	56. 00	56. 21
30	56. 42	56. 64	56. 85	57. 07	57. 28	57. 49	57. 71	57. 92	58. 14	58. 35
40	58. 56	58. 78	58. 99	59. 20	59. 42	59. 63	59. 85	60. 06	60. 27	60. 49
50	60. 70	60. 92	61. 13	61. 34	61. 56	61. 77	61. 93	62. 20	62. 41	62. 63
60	62. 84	60. 05	63. 27	63. 48	63. 70	63. 91	64. 12	64. 34	64. 55	64. 76
70	64. 98	65. 19	65. 41	65. 62	65. 83	66. 05	66. 26	66. 48	66. 69	66. 90
80	67. 12	67. 33	67. 54	67. 76	67. 97	68. 19	68. 40	68. 62	66. 83	69. 04
90	69. 26	69. 47	69. 68	69. 90	70. 11	70. 33	70. 54	70. 76	70. 97	71. 18
100	71. 40	71. 61	71. 83	72. 04	72. 25	72. 47	72. 68	72. 90	73. 11	73. 33
110	73. 54	73. 75	73. 97	74. 18	74. 40	74. 61	74. 83	75. 04	75. 26	75. 47
120	75. 68									

(2) MF51 型半导体热敏电阻. 该电阻是由一些过渡金属氧化物(主要用 Mn、Co、Ni、Fe 等氧化物)在一定的烧结条件下形成的半导体金属氧化物作为基本材料制成，具有 P 型半导体的特性. 对于一般半导体材料，电阻率随温度的变化主要依赖于载流子浓度，而迁移率随温度的变化相对来说可以忽略. 但上述过渡金属氧化物则有所不同，在室温范围内基本上已全部电离，即载流子浓度基本上与温度无关，此时主要考虑迁移率与温度的关系. 随着温度升高，迁移率增加，电阻率下降，故这类金属氧化物半导体是一种具有负温度系数的热敏电阻元件，其电阻-温度特性见表 5. 5. 4. 根据理论分析，其电阻—温度特性的数学表达式通常可表示为

$$R_t = R_{25} \cdot \exp[B_n(1/T - 1/298)] \tag{5.5.27}$$

式中，R_{25}，R_t 分别为25℃和 t℃时热敏电阻的电阻值，$T=273+t$；B_n 为材料常数，制作时不同的处理方法其值不同. 对于确定的热敏电阻，可以由实验测得的电阻—温度曲线求得. 我们也可以把上式写成比较简单的表达式

$$R_t = R_0 e^{E/kT} = R_0 e^{B_n/T} \tag{5.5.28}$$

因此，热敏电阻的阻值 R_t 与 t 为指数关系，是一种典型的非线性电阻. 式中 $R_0 = R_{25} e^{-B_n/298}$. k 为玻尔兹曼常量，其特性见表5.5.4.

表 5.5.4 2.7kΩMF51型热敏电阻的电阻-温度特性(供参考)

温度/℃	25	30	35	40	45	50	55	60	65
电阻/Ω	2700	2225	1870	1573	1341	1160	1000	868	748

【实验内容】

1. 必做部分

1) 用惠斯通电桥(平衡电桥)测量铜电阻Cu50的 $R(t)$

根据表5.5.1电阻变化情况，通过面板上的 R_1，R_2 二组开关来确定比率 k 值，将"双桥量程倍率选择"开关置于"单桥"位置，"功能、电压选择"开关置于"单桥(5V)"或"单桥15V"(表5.5.1). 按下G、B开关，调节测量盘 $R3$，使电桥处于平衡状态(电流表示数为0). 记录温度和电阻值 R. 开始升温，每隔5℃测量1个点，记录入表5.5.5. 加热温度范围为室温到65℃.

表 5.5.5

温度/℃									
电阻/Ω									

2) 非平衡电桥电压输出形式测星铜电阻Cu50的 $R(t)$

(1) 采用卧式电桥测量.

① 确定各臂电阻值. 设室温时铜电阻的电阻值为 R(用万用表测量)，使 $R=R_1=R_4$，$R'=R_2=R_3=30\Omega$(供参考，可以自己另行设计).

② 预调平衡，将待测电阻接至 R_x，R_2、R_3 调至30Ω，功能转换开关转至电压输出，G、B开关处于接通(按下)状态，调节 R_1，使电压输出 $U_0=0$.

③ 开始升温，每5℃测量1个点，同时读取温度和输出 $U_0(t)$. 因为温度和电压均为数字式，所以可以连续升温同时读取温度和电压值，列入表5.5.6.

表 5.5.6

温度/℃									
$U_0(t)$/mV									

(2) 采用立式电桥测量.

① 自行设计桥臂电阻 R、R'(预习时完成).

② 预调平衡,步骤与上述相类似.

③ 升温测量,数据列表 5.5.7.

表 5.5.7

温度/℃									
$U_0(t)$/mV									

2. 选做部分

采用非平衡电桥功率输出测量 27kΩMF51 的 $R(t)$,温度范围为室温到 65℃.

由于功率桥的测量范围比电压输出时的测量范围要大得多,可以选用等臂电桥或卧式电桥.

(1) 选择桥式电路并确定桥臂电阻 R'.

(2) 根据(5.5.14)式计算 R_g.

(3) 预调平衡.

①将待测电阻接到 R_x. ②测量室温时的 R_g 按设计要求调节 R_1、R_2、R_3. ③调 R'_g.

用数字电压表测量电流时,需在电路中设一采样电阻 R_s,如图 5.5.8 所示. 为了消除测量误差,应该把采样电阻 R_s 包含在负载电阻 R_g 中.

$$R_g = R'_g + R_s \tag{5.5.29}$$

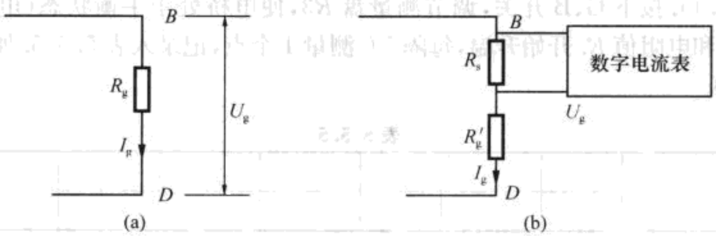


图 5.5.8 电流测量线路

面板上调节的负载电阻为 R_g

$$R'_g = R_g - R_s \tag{5.5.30}$$

功率 1 位置是测量小电阻的,其采样电阻为 $R_s = 10\Omega$,功率 2 位置是测量大电阻的,其采样电阻 $R_s = 1\text{k}\Omega$.

本实验中由于测量大电阻,采样电阻 $R_s = 1\text{k}\Omega$,预调 $R > R'_g = R_g - 1\text{k}\Omega$.

(4) 升温,每 5℃测一个点,同时读取一组 $\Delta I_g(t)$-t 和 $\Delta U_g(t)$-t 数据,并列表.

【数据处理】

1. 必做内容部分

(1) 平衡电桥. 作 $R(t)$-t 图,由图求出电阻温度系数 $\alpha = \dfrac{\Delta R}{R_0 \Delta t}$,与理论值相比较,求出百分误差,并写出表达式. R_0 为 0℃时的电阻值,可查表得到.

(2) 非平衡电桥——卧式. 由(5.5.9)式求出各点的 $\Delta R(t)$ 和 $R(t)$ 值，然后作 $R(t)$-t 图，用图解法求出 0℃时的电阻值 $R(0)$ 和电阻温度系数 α.

(3) 非平衡电桥——立式. 由(5.5.8)式求出各点的 $\Delta R(t)$ 和 $R(t)$ 值，用最小二乘法求 0℃时的电阻值 $R(0)$ 和 α，计算 α 的标准不确定度.

(4) 比较三种测量方法并分析其误差.

2. 选做内容部分

(1) 数据处理方法一.

① 由(5.5.17)式由 $\Delta I_g(t)$-t 计算得到 $\Delta R_I(t)$.

② 由(5.5.18)式，由 $\Delta U_g(t)$ 计算得到 $\Delta R_V(t)$.

③ 由公式 $\Delta R(t)=\sqrt{\Delta R_I+\Delta R_U}$ 计算得到每一测点的 $\Delta R(t)$.

④ 计算得到 $R(t)=R+\Delta R(t)$.

⑤ 作 $R(t)$-t 图.

(2) 数据处理方法二.

① 由 $\Delta I_g(t)$ 和 $\Delta U_g(t)$ 得到功率变化 $\Delta P(t)=\Delta I_g\times\Delta U_g$.

② 由(5.5.19)式由 $\Delta P(t)$ 计算得到 $R(t)$.

③ 计算 $R(t)=R+\Delta R(t)$.

④ 作 $R(t)$-t 曲线.

两种处理方法任选一种.

(3) 数据处理方法三.

由(5.5.28)式可得 $\ln R_t=\ln R_0+\dfrac{E}{kT}$，由此可知 $\ln R_t$ 与 $1/T$ 成线性关系. 用最小二乘法拟合该直线，并求出 E.

【习题】

(1) 简述平衡电桥与非平衡电桥的特点.

(2) 分析 $\Delta R/R$ 值对电桥测量误差的影响.

(3) 举出一两个非平衡电桥在工程中应用的例子.

【附录】 DHW-2 型　温度传感器实验装置

DHW-2 型温度传感实验装置是为配合非平衡电桥测试温度时配套使用的实验装置. 传感器配有热敏电阻 2.7kΩMF51、铜电阻 Cu50. 本装置采用智能温度控制器控温，具有以下的特点：

(1) 控温精度高、范围广，加热所需的温度可自由设定，采用数字显示.

(2) 使用低电压恒流加热，安全可靠，无污染. 加热电流连续可调.

(3) 同时配装了铜电阻、热敏电阻传感器，给实验带来了很大的方便，可对不同传感器的温度特性进行比较.

(4) 配有两个加热炉.在实验过程中,根据实验的需要两只加热炉可轮换使用,减少了实验时间.

(5) 加热炉配有风扇,在实验过程中可采用风扇快速降温.

1. DHW-2 型温度传感实验装置温控仪面板说明(图 5.5.9)

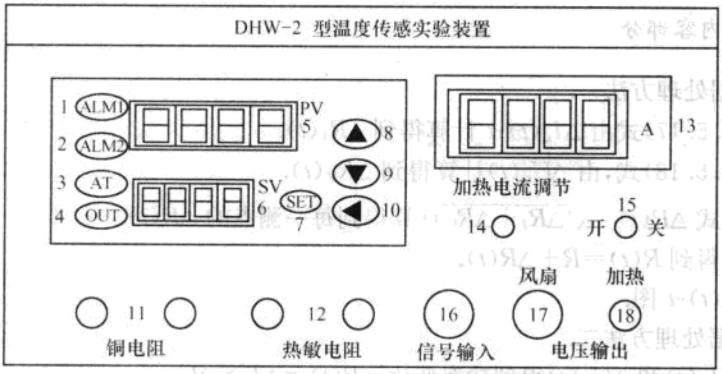


图 5.5.9 DHW-2 温度传感实验装置温控仪面板

(1) 指示灯(ALM1 红):第一报警指示灯,第一报警输出点亮.

(2) 指示灯(ALM2 红):第二报警指示幻,第二报警输出时点亮(无触点输出).

(3) 指示灯(AT 绿):自整定指示灯,工作时闪烁.

(4) 指示灯(OUT 绿):控制输出指示灯,控制输出工作时点亮.

(5) 测量值(PV):显示器(绿)①显示测量值;②显示参数名称.

(6) 设定值(SV):显示器(橙)①显示设定值;②显示参数内容;③显示控制回路异常;④显示测量回路异常.

(7) 设定键(SET):SV 设定:按 SET 键、SV 显示器个位数码管闪烁,可用其余三键修改,按 SET 键确认并返回至正常显示 SV.

(8) 加数键(▲):在参数设定状态下,作加数键.

(9) 减数键(▼):①在正常显示状态下,当前输出值显示用;②在参数设定状态下,作减数键.

(10) 自动/手动键(◀):①在正常显示状态下,作自动/手动切换用;②在参数设定状态下作移位键.

(11) 铜电阻输出端子.

(12) 热敏电阻输比端子.

(13) 加热电流显示屏.

(14) 加热电流调节电位器.

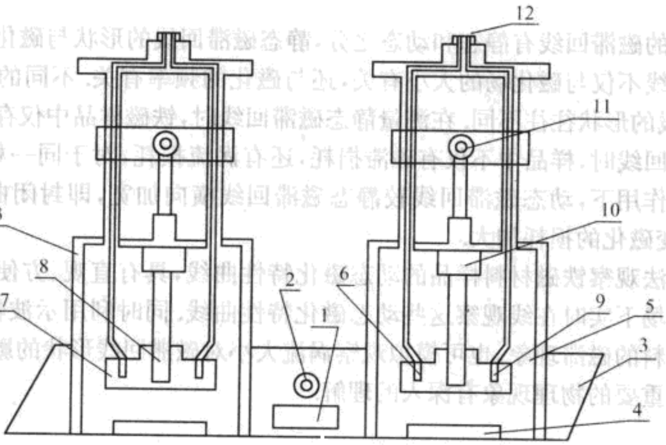
(15) 加热电流输出控制开关.

(16) 加热炉信号输入插座.

(17) 风扇电压输出插座.

(18) 加热电流输出插座.

2. DHW72 温度传感实验加热装置结构(图 5.5.10)



1.风扇开关；2.风扇电压输入插座；3.底座；4.风扇；5.隔离圆筒；6.测温传感器；7.测试圆铜块；8.加热器；9.被测传感器；10.隔离块；11.加热电流输入插座；12.信号输出插座；13.隔热层

图 5.5.10　DHW-2 温度传感实验加热装置结构

3. 使用方法

在使用之前,先把温度控制实验仪底部的支撑架竖起,以便测试时方便观察及操作.

1) 接电源

按照面板及测试架的各项功能用实验连线将其中一只加热炉连接好,经检查无误后,将专用电源线插入电源插座,打开后面板上的电源开关,接通电源.此时温度控制器的 PV 显示屏显示的温度为环境温度.

2) 加热温度的设定

根据实验的需要,设定加热温度上限,具体的操作步骤如下:

(1) 按一下温控器面板上设定键(SET),此时设定值(SV)显示屏个位开始闪烁.

(2) 根据实验所需温度的大小,通过面板自动/手动键(◀)左右移动到所需设定的位置,然后通过加数键(▲)、减数键(▼)来设定所需的加热温度.

(3) 设定加热温度后,按一下设定键(SET)确认,等待数秒钟后返回至正常显示状态.

3) 加热

在设定好加热温度后,等待数秒钟,此时面板上的控制输出指示灯(OUT 绿)点亮,此时将面板上的加热电流开关打开.温控仪开始给加热炉加热,在使用时可根据所需升温速度的快慢以及环境温度与所需加热温度的大小,调节电流调节旋钮,输出一个合适的加热电流.加热电流的大小通过面板上的(13)——加热电流显示屏显示.在接近加热温度设定

点时适当减小加热电流，以减少温度的过冲.

实验 5.6　用示波器测量铁磁材料的磁滞回线

铁磁材料的磁滞回线有静态和动态之分，静态磁滞回线的形状与磁化场的大小有关，而动态磁滞回线不仅与磁化场的大小有关，还与磁化的频率有关. 不同的磁化场，不同的频率，磁滞回线的形状往往不同. 在测量静态磁滞回线时，铁磁样品中仅存在磁滞损耗，而测量动态磁滞回线时，样品中不仅有磁滞损耗，还有涡流损耗，对于同一材料样品在相同强度的磁化场作用下，动态磁滞回线较静态磁滞回线横向加宽，即封闭曲线内面积大一些，这表明交变磁化的损耗加大.

用示波器法观察铁磁材料样品的动态磁化特性曲线，具有直观、方便和迅速等优点，并能在交变磁场下实时在线观察这些动态磁化特性曲线. 同时利用示波器的调辉功能可观察到铁磁材料的磁滞现象，也可模拟观察涡流大小对磁滞回线形状的影响，使学生对磁滞和涡流两个重要的物理现象有深入的理解.

【实验目的】

(1) 了解铁磁材料在交变磁场中的特性.

(2) 用示波法观察铁磁材料的磁滞回线和基本磁化曲线，测出 H_c、H_s、B_r、B_s 的相应值.

【实验器材】

示波器、交流电源、磁环、交流电阻箱、电容箱.

【实验原理】

如图 5.6.1 所示，L 为待测样品的平均长度（虚线框），N_1、N_2 分别为初、次级匝数，R_1、R_2 为电阻，C 为电容.

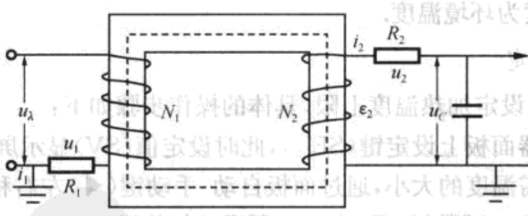


图 5.6.1

当初级端输入交流电压 u_1 时就产生交变的磁化电流 i_1；由安培环路定律可算得磁场强度 H 为

$$H = \frac{N_1 i_1}{L} \tag{5.6.1}$$

又因

$$i_1 = \frac{u_1}{R_1} \tag{5.6.2}$$

所以

$$H=\left(\frac{N_1}{L}\right)\frac{u_1}{R_1}=\frac{N_1}{LR_1}\cdot u_1 \tag{5.6.3}$$

$$u_1=\frac{LR_1}{N_1}H \tag{5.6.4}$$

由上式可知 $H\propto U_1$,加到示波器 X 轴的电压 $u_x=u_1$ 确能反映 H.

交变的 H 在样品中产生交变的磁感应强度 B,在次级线圈中产生感应电动势

$$\varepsilon_2=-N_2S\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} \tag{5.6.5}$$

$$\varepsilon_2=i_2R_2+u_C \tag{5.6.6}$$

式中,i_2 为次级电流,u_C 为电容 C 上的电压.

$$u_C=\frac{Q}{C}=\frac{1}{C}\int i_2\mathrm{d}t$$

当次级回路中所选元件 R_2 和 C 很大,满足 $R_2\gg\frac{I}{\omega C}$ 时,可得到

$$i_2=\frac{\varepsilon_2}{R_2}=\frac{N_2S}{R_2}\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} \tag{5.6.7}$$

$$i_2=\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}=C\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t} \tag{5.6.8}$$

$$C\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}=-\frac{N_2S}{R_2}\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} \tag{5.6.9}$$

将(5.6.9)式两边积分,整理后可得到 B 的数值为

$$B=\frac{R_2C}{N_2S}u_C \tag{5.6.10}$$

或

$$u_C=\frac{N_2S}{R_2C}B \tag{5.6.11}$$

(5.6.11)式表明电容器 C 上的电压 $u_C\propto B$,u_C 确反映 B 的特性.式中,N_2 为次级线圈匝数,S 为环的截面积,R_2 和 C 都是固定值.

可见,只要将 u_1、u_C 分别接到示波器的 X 轴和 Y 轴输入,则在荧光屏上扫出来的图形就能如实地反映被测样品的磁滞回线.依次改变 u_1(从 0 递增)值,便可得到一组磁滞回线,各条磁滞回线顶点的连线便是基本磁化曲线.

基本磁化曲线上的点与原点的连线的斜率为磁导率

$$\mu=\frac{B}{H} \tag{5.6.12}$$

【实验内容】

用示波器观测铁磁材料的磁滞回线(B-H 曲线),是把与样品上的磁场强度 H 成正比的电压 u_x 加到"X 轴输入",把与相应磁感应强度 B 成正比的电压 u_y 加到"Y 轴输入".

(1) 画出测量磁滞回线的实验线路图.

(2) 定出磁滞回线各顶点所代表的 u_1 和 u_C 值(即 H 和 B 值),画出基本磁化曲线,



图 5.6.2

测出 H_c、H_m、B_r、B_m 的相应值.

【注意事项】

当输入电压 u_1 增加时,磁滞回线顶点会出现编织状小环,如图 5.6.2 所示. 这时调节电阻 R_2,此现象即可消除.

【习题】

(1) 用示波法测量磁参数时误差的主要来源是什么?

(2) 若取样低电阻 R_H 是一个有可观电感的电阻,示波器荧光屏上能否观察到没有畸变的动态磁滞回线图形? 为什么?

(3) 磁滞损耗是如何产生的? 它与什么有关? 如何减少磁滞损耗? 涡流损耗又是如何产生的,如何减少涡流损耗?

实验 5.7 方波电信号的傅里叶分析

任何一个周期性函数都可以用傅里叶级数来表示,这种用傅里叶级数展开并进行分析的方法在数学、物理、工程技术等领域都有广泛的应用. 例如,要消除某些电器、仪器或机械的噪声,就要分析这些噪声的主要频谱,从而找出消除噪声的方法;而要得到某种特殊的周期性电信号,可以利用傅里叶级数合成,将一系列正弦波形合成所需的电信号等. 本实验利用串联谐振电路,对方波电信号进行频谱分析,测量基频和各阶倍频信号的振幅以及它们之间的相位关系,然后将此过程逆转,利用加法器将一组频率倍增而振幅和相位均可调节的正弦信号合成方波信号.

【实验目的】

(1) 通过实验加深理解傅里叶分解和合成的物理意义.

(2) 利用 RLC 串联谐振电路将方波(或三角波)进行傅里叶频谱分解,测量基频和各阶倍频信号的振幅及频率,说明它们之间的比例关系.

(3) 利用加法器将一组频率可以倍增而振幅及相位均可调节的正弦波信号合成方波(或三角波).

【实验原理】

1. 电信号的傅里叶分解

任意一个周期为 T 的函数 $f(t)$ 都可以表示为下列傅里叶级数

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n\cos n\omega t + b_n\sin n\omega t) \tag{5.7.1}$$

式中,$\omega = 2\pi/T$ 为角频率,称为基频,a_0 为直流分量,a_n 或 b_n 称为第 n 次谐波的幅值. 因此,任何非简谐式周期性交流电均可按(5.7.1)式展开分解为一系列不同频率、不同振幅

的简谐成分.

周期为 T、振幅为 A 的方波(图 5.7.1),其数学表达式为

$$F(t)=\begin{cases}A, & 0\leqslant t\leqslant T/2\\ -A, & -T/2\leqslant t\leqslant 0\end{cases}\tag{5.7.2}$$

其傅里叶展开式为

$$\begin{aligned}f(t)&=\frac{4A}{\pi}\left(\sin\omega t+\frac{1}{3}\sin3\omega t+\frac{1}{5}\sin5\omega t+\frac{1}{7}\sin7\omega t+\cdots\right)\\&=\frac{4A}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{2n-1}\sin(2n-1)\omega t\end{aligned}\tag{5.7.3}$$

如图 5.7.2 所示的三角波,其数学表达式为

$$F(t)=\begin{cases}4At/T, & (-T/4\leqslant t\leqslant T/4)\\ 2A(1-2t/T), & (T/4\leqslant t\leqslant 3T/4)\end{cases}\tag{5.7.4}$$

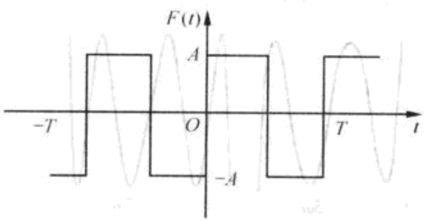


图 5.7.1　方波信号

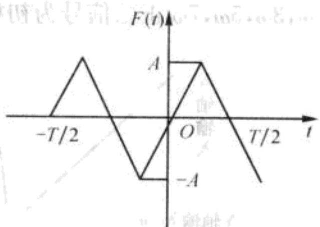


图 5.7.2　三角波信号

其傅里叶展开式为

$$\begin{aligned}f(t)&=\frac{8A}{\pi^2}\left(\sin\omega t+\frac{1}{3^2}\sin3\omega t+\frac{1}{5^2}\sin5\omega t+\cdots\right)\\&=\frac{8A}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}(-1)^{n-1}\frac{1}{(2n-1)^2}\sin(2n-1)\omega t\end{aligned}\tag{5.7.5}$$

利用图 5.7.3 的 RLC 串联谐振电路将方波(或三角波)进行傅里叶级数分解. 在 RLC 串联电路中输入正弦信号,当其频率为 $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 时,则此电路将产生谐振、电路中电流达到极大值,R 两端电压亦为最大. 对于不同频率的正弦信号,可以固定 R 和 L,通过改变 C 来获得谐振. 因此,给 RLC 串联电路中输入方波信号时,只要改变 C 就可将不同频率的正弦信号选择出来. 谐振时电路的总阻抗 $Z=R$,因此测得 R 两端电压,即可得到正弦信号的幅值. 正弦信号的频率和幅值均可用示波器测量.

为了达到选频的目的,我们希望非谐振频率分量此刻在电路中的电流越小越好,电路中的电流主要是谐振频率分量.

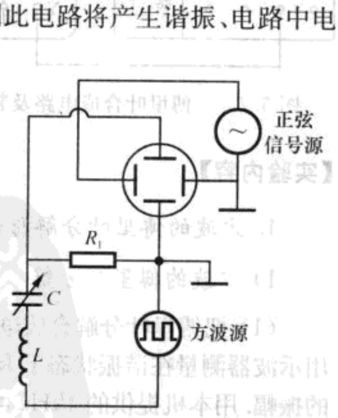


图 5.7.3　RLC 串联谐振选频电路

实验时需要注意以下几点:

(1) 电阻值不要选得太大,以保证电路有较高的 Q 值(选择性).

(2) 实际上电源内阻 r 和电感 L 的损耗电阻 R_L 不可忽略,而且由于趋肤效应的影响,R_L 将随电源频率的升高而增加,所以应测量出电源内阻和基频及各阶倍频时电感的损耗电阻,并考虑如何对正弦信号的幅值进行修正.

(3) 在测量基频及各阶倍频幅值时,应保持方波(或三角被)的幅值恒定.

2. 傅里叶级数的合成

与上述情况相反,若要用一系列正弦波合成频率为 ω 的方波,需要具备如下条件:

(1) 有一组正弦波信号源,它的频率分别是 $\omega, 3\omega, 5\omega, 7\omega, \cdots$.

(2) 这些正弦波信号振幅可调为 $1:1/3:1/5:1/7:\cdots$.

(3) 这些正弦波的初相位可以用 RC 移相器调节到初相位均相同,也就是满足(5.7.3)式的条件.这时将这些信号输入加法器,可用示波器观察合成后的方波信号.待合成的 $\omega, 3\omega, 5\omega, 7\omega$ 正弦信号为初相位相同,如图 5.7.4 所示.

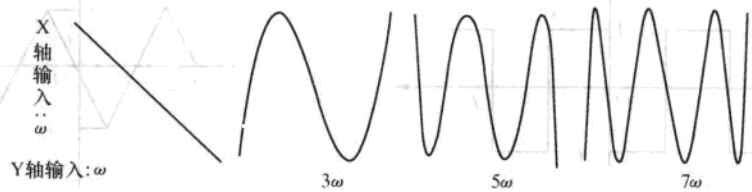


图 5.7.4 各同相位谐波显示的李萨如图形

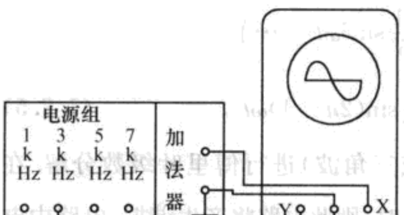


图 5.7.5 傅里叶合成电路及装置

【实验仪器】

功率函数发达器、傅里叶分解合成仪、双踪示波器、标准电感、标准电容箱、电阻箱.

傅里叶分解合成装置由电源组、加法器、示波器、可调电容箱、电感器、电阻等组成,电源组包括频率为 1kHz 的方波电源和一组可调节幅值和相位的正弦波电源(频率为 1、3、5、7kHz 四种).傅里叶分解部分电路如图 5.7.3 所示;傅里叶合成部分电路及装置如图 5.7.5 所示.

【实验内容】

1. 方波的傅里叶分解与合成(必做部分)

1) 方波的傅里叶分解

(1) 把傅里叶分解合成电源组中的 1kHz 频率方波信号输入 RLC 串联电路(图 5.7.3).用示波器测量在谐振状态下 R 两端的电压,以求得方波信号分解出的基频和各阶倍频信号的振幅.用本机提供的 1kHz 可调振幅与相位的正弦波参考信号与基频 1kHz 正弦波信号构成李萨如图形,调节参考信号的相位,使参考信号与基频信号同相位(图形为一直线).

(2) 用已调好的 1kHz 参考信号、与 RLC 串联谐振电路选出的 3kHz 谐波、5kHz 谐波分别用李萨如图形法观测它们是否同相位，以此得出基波与各阶谐波间的相位关系.

(3) 由于电感 L 的损耗电阻随频率增加而增加，因此必须对用示波器测量到的 3kHz、5kHz 等谐波的幅值进行修正. 以 3kHz 谐波为例，如图 5.7.3 所示，若信号源输出方波的 3kHz 正弦分量的电压幅值为U，信号源内阻为r，3kHz 的谐波电流通过电感L时的损耗电阻 R_{L3}，电阻 R 两端电压为U_3'，那么

$$U=\frac{U_3'}{R}(R+R_{L3}+r) \tag{5.7.6}$$

假定电感的损耗电阻不随频率而变，仍为 R_{L1}（1kHz 频率电流通过时的损耗电阻），则 R 两端电压应是 U_3、即有

$$U=\frac{U_3}{R}(R+R_{L1}+r) \tag{5.7.7}$$

由(5.7.6)式和(5.7.7)式可得经校正后的电压值为

$$U_3=U_3'\frac{R+R_{L3}+r}{R+R_{L1}+r} \tag{5.7.8}$$

电感 L 在使用 1kHz 电源、3kHz 电源、5kHz 电源时的损耗电阻值 R_{L1}、R_{L3}、R_{L5} 由实验室提供或自己测量.

2) 将一组奇数倍频正弦波合成方波

用傅里叶分解合成仪中的一组可调幅、调相位的正弦信号合成方波信号. 合成步骤如下：

(1) 用李萨如图形法反复调节各谐波的移相器，使 1kHz、3kHz、5kHz、7kHz 正弦信号的初相位均相同，见图 5.7.3 和图 5.7.5.

(2) 调节仪器中信号输出增益旋钮，使 1kHz、3kHz、5kHz、7kHz 正弦信号的振幅比为 1∶1/3∶1/5∶1/7.

(3) 把 1kHz 正弦信号输入加法器后，输入 3kHz 谐波信号，观察叠加后合成波形；其次在上述两信号合成的基础上，再增加输入 5kHz 谐波信号、观察合成波形发生什么变化；最后，在前者基础上再增加输入 7kHz 谐波信号，观察并记录示波屏上合成波形的变化情况，将合成方波与方波波形进行比较.

2. 选做部分

(1) 增加 RLC 串联电路中电阻R 的值，使电路 Q 值减小观测此时电路的选频效果以此说明 Q 值的物理意义.

(2) 进行三角波的分解与合成，实验方法自拟.

【预习思考】

(1) 不同频率电流流过后为何良导体绕的电感线圈其损耗电阻值(交流电阻)有所不同？试述几种不同工作频率时损耗电阻的测量方法. 方波电源内阻怎样测定？

(2) 傅里叶级数合成过程中，合成波形与叠加谐波的阶数有何关系？合成过程中，多增加一阶谐波，合成方波顶部和前后沿有何变化？

【习题】

(1) 测出使电路达到谐振时的各电容值 C 验证其电容比为

$$C_1 : C_3 : C_5 = 1 : 1/5 : 1/9 : 1/25 : \cdots$$

(2) 测量基频及各阶倍频信号的频率,计算出它们之间的比例关系.

实验 5.8 用非线性电路研究混沌现象

长期以来,人们在认识和描述运动时,大多局限于线性动力学描述方法,即确定的运动有一个完美确定的解析解. 但是,自然界在相当多情况下,非线性却起着很大的作用. 1963 年美国气象学家 Lorenz 在分析天气预报模型时,首先发现空气动力学中的混沌现象,该现象只能用非线性动力学来解析. 1975 年混沌作为一个新的科学名词,首先出现在科学文献中. 基于混沌运动是存在于自然界中的一种普通运动形式,进入 20 世纪 90 年代以来,对混沌的研究不仅推动了其他学科的发展,而且其他学科的发展又促进了对混沌的深入研究. 混沌与其他学科相互交叉、渗透、促进,综合发展,使得混沌不仅在生物学、数学、物理学、化学、电子学、信息科学、气象学、宇宙学、地质学,还在经济学、人脑科学,甚至在音乐、美术、体育等多个领域中得到了广泛的应用. 本实验将引导学生自己建立一个非线性电路,采用物理实验方法研究观测振动周期发生的分岔及混沌现象,从而对非线性电路及混沌现象有初步了解.

【实验目的】

(1) 掌握用示波器观测正弦波形的周期分岔及混沌现象的方法.

(2) 学会自己设计和制作一个实用电感器以及测量非线性器件伏安特性的方法.

【实验原理】

1. 非线性电路与非线性动力学

实验电路如图 5.8.1 所示,图中只有一个非线性元件 R,它是一个有源非线性负阻元件. 电感器 L 和电容器 C_2 组成一个损耗可以忽略的谐振回路,可变电阻 R_V 和电容器 C_1 串联将振荡器产生的正弦信号移相输出. 较理想的非线性元件 R 是一个三段分段线性元件. 图 5.8.2 所示的是该电阻的伏安特性曲线,特性曲线显示加在此非线性元件上的电压与通过它的电流极性是相反的. 由于加在此元件上的电压增加时,通过它的电流却减小,因而将此元件称为非线性负阻元件.

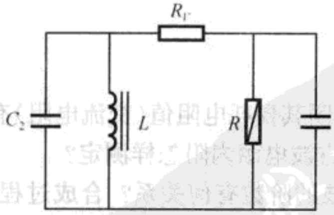


图 5.8.1 非线性电路原理图

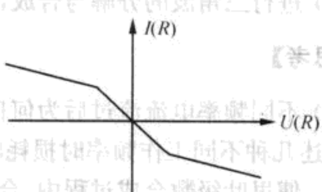


图 5.8.2 非线性元件的伏安特性

图5.8.1所示电路的非线性动力学方程为

$$C_1 = \frac{dU_C}{dt} = G \cdot (U_{C_2} - U_{C_1}) - g \cdot U_{C_1} \tag{5.8.1}$$

$$C_1 = \frac{dU_C}{dt} = G \cdot (U_{C_2} - U_{C_1}) = + i_L \tag{5.8.2}$$

$$L \frac{di_L}{dt} = - U_{C_2} \tag{5.8.3}$$

式中，导纳 $G=1/R_V$，U_{C_1} 和 U_{C_2} 分别为加在 C_1 和 C_2 上的电压，i_L 为流过电感器 L 的电流，G 为非线性电阻的导纳.

2. 有源非线性负阻元件的实现

有源非线性负阻元件实现的方法有多种，这里使用的是一种较简单的电路，采用两个运算放大器（双运放 TL082）和六个配置电阻来实现，其电路如图5.8.3所示，它的伏安特性曲线如图5.8.4所示. 由于本实验研究的是该非线性元件对整个电路的影响，只要知道它主要是一个负阻电路（元件），能输出电流维持 LC_2 振荡器不断振荡，而非线性负阻元件的作用是使振动周期产生分岔和混沌等一系列现象.

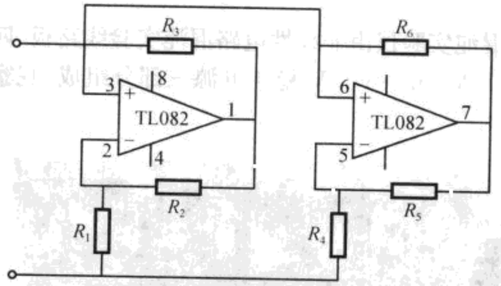


图5.8.3　有源非线性器件

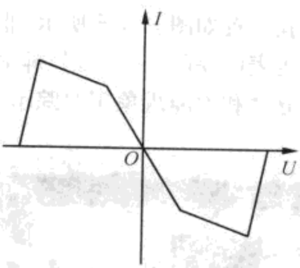


图5.8.4　双运放非线性元件的伏安特性

实际非线性混沌实验电路如图5.8.5所示.

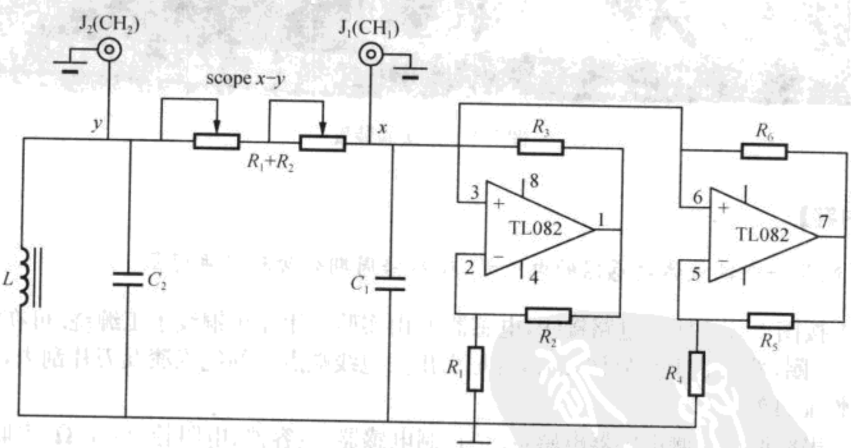


图5.8.5　非线性电路混沌实验电路图

3. 名词解释

本名词解释引自洛伦兹《混沌的本质》一书的附录3“简明词汇”. 这些定义是描述性的,并非是标准数学定义,但有助于初学者对这些名词的理解. 这些词汇定义多数是按相空间作出的.

(1) 分岔:在一个系统中,当一个参数值从某一临界值以下变到该临界值以上时,系统长期行为的一个突然变化.

(2) 混沌:①表征一个动力系统的特征,在该系统中大多数轨道显示敏感依赖性,即完全混沌. ②有限混沌,表征一个动力系统的特征,在该系统中某些特殊轨道是非周期的,但大多数轨道是周期或准周期的.

(3) 奇怪吸引子,也称“随机吸引子”、“混沌吸引子”. 它是相空间中无穷多个点的集合,这些点对应于系统的混沌状态. 它是一种抽象的数学对象. 因此,它常常隐藏在混沌现象的背后,借助于计算机可描绘出它的图形. 它是一类具有无限嵌玄层次的自相似几何结构,是一种分形.

【实验器材】

实验装置如图5.8.6所示. 非线性电路混沌实验仪由非线性电路混沌实验线路板、四位半电压表(量程0~20V,分辨率1mV)、−15V~0~+15V稳压电源三部分组成. 观察倍周期分岔和混沌现象用双踪示波器.

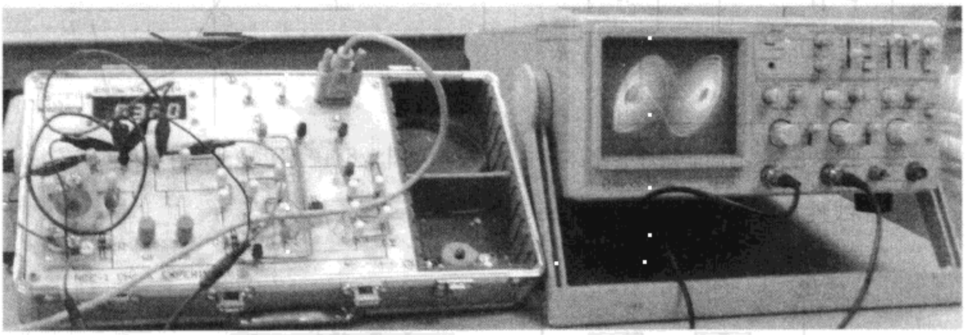


图5.8.6 实验装置

【实验内容】

1. 测量一个铁氧体电感器的电感量,观察倍周期分岔和混沌现象

(1) 按图5.8.5所示电路接线,电感器L由实验者用漆包铜线手工缠绕. 可在线框上绕80~90圈,然后装上铁氧体磁心,并把引出漆包线端点上的绝缘漆及刀片刮去,使两端点导电性能良好.

(2) 串联谐振法测电感器电感量. 把自制电感器、电容器、电阻箱(取10Ω)串联,并与低频信号发生器连接. 用示波器测量电阻两端的电压,调节低频信号发生器正弦波频率,

使电阻两端电压达到最大值. 同时，计算通过电阻的电流值 I. 要求达到 $I=5\text{mA}$(有效值)时，电感器的电感量 $L=17.5\text{mH}$.

(3) 把自制电感器接入如图 5.8.5 所示的电路中，调节 R_V 阻值. 在示波器上观测如图 5.8.5 所示的 CH1—地和 CH2—地所构成的相图(李萨如图)，调节电阻 R_1+R_2，阻值由大至小时，描绘相图周期的分岔及混沌现象. 将一个环形相图的周期定为 p、那么要求观测并记录 $2p$，$4p$，陈发混沌，$3p$，单吸引子(混沌)，双吸引子(混沌)共六个相图和相应的 CH1—地和 CH2—地两个输出波形.

2. 选做部分

把有源非线性负电阻元件与 RC 移相器连续断开，测量非线性单元电路在电压 $U<0$ 时的伏安特性，作 I-U 关系图，并进行直线拟合(思考：什么是负阻？从伏安特性曲线上如何体现负阻概念?).

【预习思考】

(1) 实验中需自制铁氧体为介质的电感、该电感器的电感量与哪些因素有关？此电感量可用哪些方法测量？

(2) 用李萨如图观察周期分岔与直接观察波形分岔相比有何优点？

(3) 非线性负阻电路(元件)在本实验中的作用是什么？

【习题】

(1) 为什么要采用 RC 移向器，并且用相图来观测倍周期分岔等现象？如果不用移相器，可用哪些仪器或方法？

(2) 通过本实验，请阐述倍周期分岔、混沌、奇怪吸引子等概念的物理含义.

实验 5.9 磁阻传感器和地磁场测量

在地球周围空间存在着磁场，即地磁场. 地磁场数值较小约 $0.5\times10^{-4}\text{T}$，其强度与方向也随地点而异. 人们在不断研究的过程中发现，地磁极和地理的南北极并不完全一致，所以磁针所指的南北方向仅仅是近似的. 磁针静止时所指的方向跟实际南北方向之间的夹角叫磁偏角. 地磁场的磁感线一般不与地面平行，而与水平面成一定的角度，这个角叫磁倾角，各地磁倾角不同，地磁极处的磁倾角为 90°. 磁偏角和磁倾角只能确定地磁场的方向，而不能表明地磁场强弱. 磁场的强弱用磁感应强度表示的，通常用水平强度来表示某处地磁场的强弱. 知道了某地的磁偏角、磁倾角和水平强度(被称为地磁场的三要素)，该点的地磁场就完全了解了. 地磁场作为一种天然磁源，在军事、航空、航海、工业、医学、探矿等科研中有着重要用途，但在直流弱磁场测量中，往往需要知道其数值，并设法消除其影响.

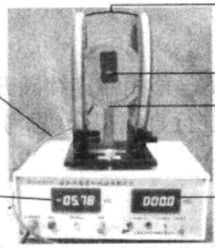
【实验目的】

(1) 了解磁阻传感器测量磁场的基本原理.

(2) 掌握用磁阻传感器测定地磁场的方法.

【实验器材】

测量地磁场的实验装置如图 5.9.1 所示. 它主要包括底座、转轴、带量角器的转盘、磁阻传感器(工作电压 6V,灵敏度 50V/T)、亥姆霍兹线圈(单只线圈匝数 $N=500$ 匝,半径 10cm)及电源、地磁场测量仪(包括数字电压表、5V 直流电源及用于复位的电脉源)等.



1. 恒流源; 2. 数字电压表; 3. 磁阻传感器输入输出引线;
4. 亥姆霍兹线圈; 5. 刻度盘; 6.磁阻传感器

图 5.9.1

【实验原理】

物质在磁场中电阻率发生变化的现象称为磁阻效应. 对于铁、钴、镍及其合金等磁性金属,当外加磁场与磁体内部磁化方向平行时,电阻几乎不随外加磁场变化;当外加磁场偏离金属的内部磁化方向时,此类金属的电阻减小,这就是强磁金属的各向异性磁阻效应.

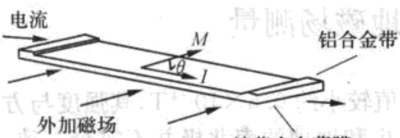


图 5.9.2　磁阻传感器的构造示意图

本实验使用的 HMC1021Z 型磁阻传感器是由长而薄的铁镍合金(坡莫合金)制成一维磁阻微电路集成芯片. 它利用通常的半导体工艺,将铁镍合金薄膜附着在硅片上,如图 5.9.2 所示. 该薄膜的电阻率 $\rho(\theta)$,依赖于磁化强度 M 和电流 I 方向间的夹角 θ,具有以下关系式

$$\rho(\theta)=\rho_{\perp}+(\rho_{/\!/}-\rho_{\perp})\cos^2\theta \qquad (5.9.1)$$

式中,$\rho_{/\!/}$、$\rho_{\perp}$ 分别为电流 I 平行于 M 和垂直于 M 时的电阻率. 当沿着铁镍合金带的长度方向通以一定的直流电流,而垂直于电流方向施加一个外界磁场时,合金带自身的阻值会发生较大的变化,利用合金带阻值这一变化,可以测量磁场大小和方向. 同时制作时还在硅片上设计了两条铝制电流带,一条是置位与复位带,该传感器遇到强磁场感应时,将产生磁畴饱和现象,也可以用来置位或复位极性;另一条是偏置磁场带,用于产生一个偏置磁场,补偿环境磁场中的弱磁场部分(当外加磁场较弱时,磁阻相对变化值与磁感应强度成平方关系),使磁阻传感器输出显示线性关系.

HMC1021Z 磁阻传感器是一种单边封装的磁场传感器,它能测量与管脚平行方向的

磁场.传感器由四条铁镍合金磁电阻组成一个非平衡直流电桥,电桥输出部分接集成运算放大器,将信号放大输出.传感器内部结构如图 5.9.3 所示.图中由于适当配置的四个磁电阻电流方向不相同,当存在外界磁场时,引起电阻值变化有增有减.因而输出电压 U_{out} 可以用下式表示为

$$U_{out} = \left(\frac{\Delta R}{R}\right) \times U_b \tag{5.9.2}$$

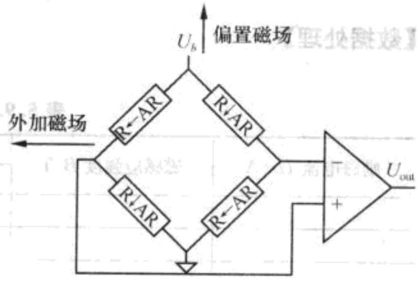


图 5.9.3　磁阻传感器内的直流电桥

在一定的工作电压下,如 $U_b = 5.00\text{V}$, HMC1021Z 磁阻传感器输出电压 U_{out} 与外界磁场的磁感应强度成正比关系

$$U_{out} = U_0 + KB \tag{5.9.3}$$

式中,K 为传感器的灵敏度,B 为待测磁感应强度. U_0 为外加磁场为零时传感器的输出电压.

由于亥姆霍兹线圈的特点是能在其轴线中心点附近产生较宽范围的均匀磁场区,所以常用作弱磁场的标准磁场.亥姆霍兹线圈公共轴线中心点位置的磁感应强度为

$$B = \frac{\mu_0 NI}{R} \cdot \frac{8}{5^{3/2}} \tag{5.9.4}$$

式中,N 为线圈匝数,I 为线圈流过的电流强度,R 为亥姆霍兹线圈的平均半径,μ_0 为真空磁导率.

【实验内容】

(1) 将磁阻传感器置于亥姆霍兹线圈公共轴线中点,并使管脚和磁感应强度方向平行,即传感器的感应面与亥姆霍兹线圈轴线垂直.用亥姆霍兹线圈产生磁场作为已知量,测量磁阻传感器的灵敏度 K.

(2) 将磁阻传感器平行固定在转盘上,调整转盘至水平(可用水准器指示).水平旋转转盘,找到传感器输出电压最大方向,这个方向就是地磁场磁感应强度的水平分量 $B_{/\!/}$ 的方向.记录此时传感器输出电压 U_1 后,再旋转转盘,记录传感器输出最小电压 U_2.由 $|U_2 - U_1|/2 = KB_{/\!/}$,求得当地地磁场水平分量 $B_{/\!/}$.

(3) 将带有磁阻传感器的转盘平面调整为铅直,并使装置沿着地磁场磁感应强度水平分量 $B_{/\!/}$ 方向放置,只是方向转 90°(怎样调节以达到此要求?).转动调节转盘,分别记下传感器输出最大和最小时转盘指示值和水平面之间的夹角 β_1 和 β_2,同时记录此最大读数 U_1' 和 U_2'.由磁倾角 $\beta = (\beta_1 - \beta_2)/2$ 计算 β 的值.

(4) 由 $|U_2' - U_1'|/2 = KB$,计算地磁场磁感应强度 B 的值.并计算地磁场的垂直分量 $B_\perp = B\sin\beta$.

(5) 用 HMC1021Z 型磁阻传感器测量通电单线圈产生磁场分布,并与理论值进行比较.

将测量的相关数据填入表 5.9.1～表 5.9.3 中.

【数据处理】

表 5.9.1 测量传感器灵敏度 K

励磁电流 I/mA	磁感应强度 B/T	U/mV		平均$\|U\|$/mV
		正向U_1/mV	反向U_2/mV	

用最小二乘法拟合，得到该磁阻传感器的灵敏度 K 和相关系数.

表 5.9.2 测量磁倾角 β

β											
$U_{总}$/mV											

直接测量地磁场水平分量$\overline{U}_{/\!/}$，计算得地磁场水平分量磁感应强度 $B_{/\!/}$，地磁场 $U_{总}$，地磁场磁感应强度 $B_{总}$，磁倾角 $\bar{\beta}$

表 5.9.3 测量地磁场 B

电压		1	2	3	4	5	平均	结果	
$U_{总}$	U_1/mV							$\|\overline{U}_{总}\|$/mV=	B/T=
	U_2/mV								
U	U_1'/mV							$\|\overline{U}_{/\!/}\|$/mV=	$B_{/\!/}$/T=
	U_2'/mV								

将实验结果与附录中我国一些城市的地磁参量进行比对.

【注意事项】

(1) 测量地磁场水平分量，须将转盘调节至水平；测量地磁场 $U_{总}$ 和磁倾角 β 时，须将转盘面处于地磁子午面方向.

(2) 测量磁倾角应记录不同 β 时，传感器输出电压 $U_{总}$，应取 10 组 β 值，求其平均值. 这是因为测量时，偏差 1°，$U'_{总}=U_{总}\cos1°=0.998$ 变化很小，偏差 4°，$U''_{总}=0.998U_{总}$，所以在偏差 1°至 4°范围 $U_{总}$ 变化极小，实验时应测出 $U_{总}$ 变化很小 β 角的范围，然后求得平均值 β.

(3) 实验仪器周围的一定范围内不应存在铁磁金属物体，以保证测量结果的准确性.

【预习思考】

(1) 磁阻传感器和霍耳传感器在工作原理和使用方法方面各有什么特点和区别？

(2) 为何坡莫合金磁阻传感器遇到较强磁场时，其灵敏度会降低？用什么方法来恢

复其原来的灵敏度？

【习题】

（1）实验的线圈装置中心区域，即与磁阻传感器相连的转动盘，其方位如何调整？

（2）该实验所用的电源面板上分别有一调零旋钮和输出旋钮各起什么作用？如何调节？

（3）在测量地磁场时，如有一枚铁钉处于磁阻传感器周围，则对测量结果将产生什么影响？

【附录】　我国一些城市的地磁参量（地磁要素）

地　名	地理位置		磁倾角 D(偏西)	磁倾角 β	水平强度 $B/10^{-4}$T
	北纬	东经			
齐齐哈尔	47°22′	123°59′	7°34′	64°27′	0.242
长春	43°51′	126°36′	7°30′	60°20′	0.266
沈阳	41°50′	123°28′	6°49′	58°4′	0.277
北京	39°56′	116°20′	4°48′	57°23′	0.289
天津	39°0′.9	117°11′	4°04′	56°21′	0.293
太原	37°51′.9	112°33′	3°18	55°11′	0.301
济南	36°39′.5	117°01′	3°36′	53°06′	0.308
兰州	36°03′.4	103°48′	1°15′	53°24′	0.312
郑州	34°45′	113°43′	0°8′	50°43′	0.320
西安	34°16′	108°7′	3°02′	50°29′	0.323
南京	32°03′.8	118°48′	1°42′	46°43′	0.331
上海	31°11′.5	121°26	3°13′	45°25′	0.333
成都	30°38′	104°03′	0°58′	45°06′	0.346
武汉	30°37′	114°20′	2°23′	44°34′	0.343
安庆	30°32′	117°02′		44°27′	0.341
杭州	30°16′	120°08′	2°59′	44°05′	0.337
南昌	28°42′.4	115°51′	1°51′	41°49′	0.349
长沙	28°12′.8	112°53′	0°51′	41°11′	0.352
福州	26°02′.2	119°11′	1°43′	27°28′	0.355
桂林	25°17′.7	110°2′	0°05′	36°13′	0.366
昆明	25°04′.2	102°42′	0°04′	35°19′	0.372
广州	23°06′.1	113°28′	0°47′	31°41′	0.375

实验 5.10　弗兰克-赫兹实验

1913 年，玻尔在描述氢原子光谱规律的基础上，建立了新的原子结构理论. 1914 年弗兰克和赫兹用低速电子去轰击稀薄汞气体原子，测量出汞原子的激发电位和电离电位，从而简单形象地证实了原子能级的存在，清晰地揭示了原子能级的图像，为玻尔理论提供了

直接而独立的实验证据，并由此获得了1925年的诺贝尔物理学奖.

【实验目的】

(1) 学习弗兰克-赫兹实验证明原子存在能级的原理与方法.
(2) 了解原子结构的能级间跃迁量子化情况.
(3) 掌握测量汞原子第一激发电势的方法.

【实验器材】

1. F-H管电源组

用来提供F-H管各级所需的工作电压.
(1) 灯丝电压 V_P，直流1～5V连续可调.
(2) 0～5V电压输出，直流0～5V连续可调.
(3) 0～5V电压输出，直流0～15V连续可调.

2. 扫描电源和微电流放大器

提供0～90V的可调直流电压或慢扫描输出锯齿波电压，作为F-H管的加速电压，供手动测量. 微电流放大器用来检测F-H管的电流.

(1) 有“手动”、“自动扫描”两种方式.“手动”测量时，输出0～90V的加速直流电压，连续可调.“自动扫描”测量时，输出周期变化的锯齿形电压，扫描电压上限幅度可调.

(2) 微电流放大器测量范围为 10^{-8}、10^{-7}、10^{-6} A三挡.

3. F-H管、加热炉及控温装置

F-H管为充汞(高纯汞滴)真空管，安装于加热炉内. 炉顶有安装温度计的小孔，与控温装置配合使用，控温范围为120～200℃.

【实验原理】

1914年弗兰克和赫兹在研究气体放电现象中低能电子与原子间相互作用时，在充汞的放电管中发现：透过汞蒸气的电子流随电子能量呈周期性变化，间隔为4.9eV，并拍摄到与能量4.9eV对应的光谱线2537Å，从而证明了原子内部确实有不连续的稳定状态和量子化能级的存在，为玻尔的原子理论提供了直接而有力的实验证据. 根据玻尔理论，原子只能处在某一状态，每一状态对应一定的能量，其数值是彼此分立的；原子在能级间进行跃迁时能吸收或发射确定频率的光子；当原子与一定能量的电子发生碰撞时可以使原子从低能级跃迁到高能级. 如果是基态和第一激发态之间的跃迁，则有

$$eU_1 = \frac{1}{2}m_e v^2 = E_1 - E_0$$

电子与原子在碰撞时，将在电场中获得的动能交给原子. 原子从基态跃迁到第一激发态 U_1，称其为原子第一激发电势.

我们用的F-H实验的真空管是汞管，在常温下是高纯汞滴液态的，饱和蒸气压很低，

加热后就可呈气态. 汞的相对原子质量较大,和电子做弹性碰撞时几乎不损失动能. 汞的激发态较低,只有 4.9eV. 四极式的F-H管如图 5.10.1 所示. 图中,U_F 为灯丝加热电压,U_{G_1K}为正向小电压,U_{G_2K}为加速电压,U_{G_2P}为减速电压.

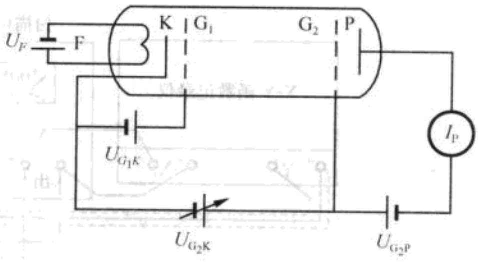


图 5.10.1

阴极被灯丝加热发射电子,在靠近阴极处加一个控制栅极 G_1,在控制栅极 G_{1K} 间加一小的正向电压,这个小电场能够有效地驱散 K 表面堆集的电子云,达到控制发射电子数的目的. 由于它靠栅极很近,电子发射后加速电压主要由 U_{G_2K}获得,因为 G_2 离阴极 K 较远. 可以说,电子由阴极出发经电场 U_{G_2K}加速趋向阳极 P,只要电子能量能克服减速电场 U_{G_2P}的束缚,就能穿过栅极 G_2 到达阳极 P 形成电子流 I_P. 由于管中充有汞蒸气(即有汞气体原子),电子前进的途中会与原子发生碰撞. 如果电子能量小于第一激发能 eU_1,它们之间的碰撞就是弹性的,电子能量损失很小,电子可到达阳极;如果电子能量达到或超过 eU_1. 电子与原子将发生非弹性碰撞,电子把能量 eU_1 传给气体原子. 如果非弹性碰撞发生在 G_2 栅极附近,损失了能量的电子将无法克服减速场 U_{G_2P},到达阳极 P.

这样,从阴极发出的电子随着 U_{G_2K}从零开始逐渐增加,阳极 P 上的电流也由零开始逐渐增加,电子获得的能量增大到 eU_1 后,电子将发生非弹性碰撞,而损失 eU_1 的能量,损失能量后的电子达不到 P,阳极电流 I_p 出现第一次大幅度下降. 随着 U_{G_2K}增加,电子与原子发生碰撞的区域向阴极方向移动,碰撞后的电子在飞向 P 极的途中又得到加速,又一次有足够的能量克服 U_{G_2P}减速电压到达阳极 P. I_p 随着 U_{G_2K}增加又开始增加. 如果 U_{G_2K}的增加使那些经过非弹性碰撞的电子的能量又达到 eU_1,则电子又将与原子发生非弹性碰撞,造成阳极电流 I_P 又一次下降. 在 U_{G_2K}较高的情况下,电子在飞向阳极的途中将与原子发生多次非弹性碰撞. 每当 U_{G_2K}造成的最后一次非弹性碰撞区落在 G_2 栅极附近时,就会使阳极电流 I_p 出现下降,出现如图 5.10.2 所示的 I_P-U_{G_2K}曲线.

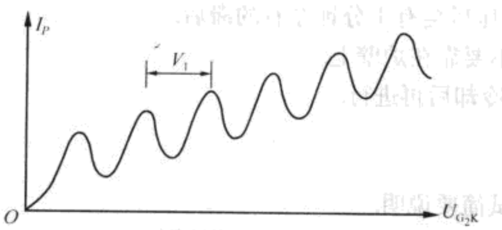


图 5.10.2

曲线的极大极小出现明显的规律性,表明能级量子化能量被吸收的结果,每相邻极大或极小值之间的电位差为第一激发电势,即汞原子的第一激发电势.

【实验内容】

(1) 按图 5.10.3 连接电路.

(2) 开启电炉加热系统,使 F-H 管置于某一温度(参看 F-H 管的参数),当炉温升至指定温度时才能做实验.

(3) 根据 F-H 管的参数,选择适当的灯丝电压 U_{G_1K}和 U_{G_2K}的电压. 用手动的方法改变加速电压,同时观察微电流计上 I_P变化.

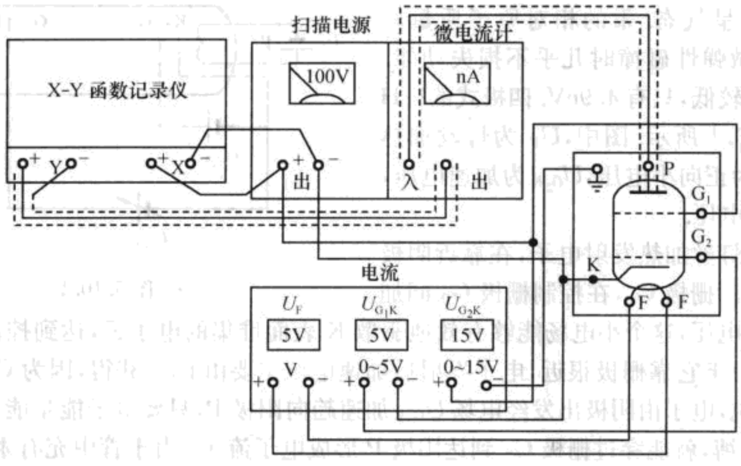


图 5.10.3

(4) 逐步调节加速电压，观察电流 I_P 出现 10 个峰谷.

(5) 选择合适的实验点记录实验数据，完整真实地绘出 I_P-U_{G_2K} 曲线.

(6) 根据 I_P-U_{G_2K} 曲线，求出汞的第一激发电位.

【注意事项】

(1) 实验使用 220V 交流单相电，地线要接触良好，以防干扰，确保安全.

(2) 实验中若产生电离击穿(即电流表严重过载现象)，要立即将加速电压减到零，检查原因后再做实验.

(3) F-H 管采用间热式阴极，改变灯丝电压后会有 1 分钟左右的滞后.

(4) 加热炉外壳温度较高，注意手、导线不要靠在炉壁上.

(5) 更换 F-H 管时. 要切断电源，待炉温冷却后再进行.

【习题】

(1) 影响做好实验的主要因素有哪些？试简要说明.

(2) 当温度较高时，I_P-U_{G_2K} 曲线的第一个极大值不易出现，试说明原因.

(3) I_P-U_{G_2K} 曲线电流下降并不十分陡峭，主要原因是什么？I_P 的谷值并不为零，而是依次沿 U_{G_2K} 轴升高，如何解释？

实验 5.11 密立根油滴实验

电子电量是物理学的基本常数之一. 自 1897 年 J. J. 汤姆逊通过阴极射线的研究测定电子荷质比之后，急需解决的问题是要直接测量出电子电量值. 美国物理学家密立根(R. A. Miliken)从 1909～1917 年用实验的方法测定了电子电量值，证实了基本电荷的存在，同时证实了物体带电的不连续性. 由于密立根油滴实验设计巧妙，技术精湛，测量结果准确，一直被公认为实验物理学的光辉典范，密立根因此荣获了 1923 年度诺贝尔物理学奖.

【实验目的】

(1) 了解、掌握密立根油滴实验的设计思想、实验方法和实验技巧.

(2) 学习、了解 CCD 图像传感器的原理与应用.

(3) 验证电荷的不连续性并测定基本电荷的电量.

(4) 通过对实验仪器的调整、油滴的选择、跟踪、测量等环节,培养学生科学的实验方法和严谨的态度.

【实验原理】

一个质量为 m,带电量为 q 的油滴处在两块平行极板之间,平行板水平放置.平行板间未加电压时油滴受重力作用(忽略空气的浮力)而加速下降,由于空气阻力的使用,下降一段距离后,油滴将做匀速运动,速度为 v_g,这时重力与阻力平衡,如图 5.11.1 所示.根据斯托克斯定律,黏滞阻力为 $f_x = 6\pi a\eta v_g$.式中,η 是空气的黏滞系数,a 是油滴半径.这时有

$$6\pi a\eta v_g = mg \tag{5.11.1}$$

当在平行板上加电压 U 时,油滴处在场强为 E 的静电场中.设电场力 qE 与重力方向相反,如图 5.11.2 所示,使油滴受电场力加速上升,由于空气阻力作用,上升一段距离后,油滴所受的电场力、重力和空气阻力达到平衡(忽略空气浮力),则油滴将匀速上升,此时速度为 v_e.于是有

$$qE = mg + 6\pi a\eta v_e \tag{5.11.2}$$

$$E = \frac{U}{d} \tag{5.11.3}$$

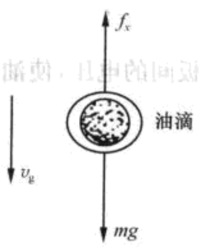


图 5.11.1

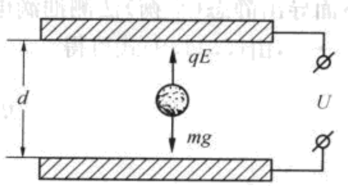


图 5.11.2

由(5.11.1)式～(5.11.3)式可解出

$$q = mg\frac{d}{U}\left(\frac{v_g + v_e}{v_g}\right) \tag{5.11.4}$$

由上式计算油滴所带电荷 q,除应测出 U、d 和速度 v_e、v_g 外,还需知油滴质量 m,由于空气中悬浮和表面张力作用,可把油滴看做圆球,其质量为

$$m = \frac{4}{3}\pi a^3\rho \tag{5.11.5}$$

式中,ρ 为油滴的密度.

由(5.11.1)式和(5.11.5)式,得油滴的半径为

$$a = \left(\frac{q\eta\eta_g}{2\rho g}\right)^2 \tag{5.11.6}$$

考虑到油滴非常小，空气已不能看成连续媒质，空气的黏滞系数 η 应修正为

$$\eta' = \frac{\eta}{1+\dfrac{b}{pa}} \tag{5.11.7}$$

式中，p 为空气压强，b 为修正常数，压强单位为 Pa 时，b 的值为 $b=8.233\times10^{-3}\,\mathrm{m\cdot Pa}$. 实验时取油滴匀速下降和匀速上升的距离相等，均设为 l，测定出油滴匀速下降的时间 t_g 匀速上升的时间 t_e，则

$$v_g = \frac{l}{t_g},\quad v_e = \frac{l}{t_e} \tag{5.11.8}$$

将(5.11.5)式～(5.11.8)式代入(5.11.4)式，可得

$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}}\left[\frac{\eta l}{1+\dfrac{b}{pa}}\right]^{\frac{3}{2}}\frac{d}{U}\left(\frac{1}{t_e}+\frac{1}{t_g}\right)\left(\frac{1}{t_g}\right)^{\frac{1}{2}}$$

令

$$k = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}}\left[\frac{\eta l}{1+\dfrac{b}{\rho a}}\right]^{\frac{3}{2}}\cdot d$$

得

$$q = k\left(\frac{1}{t_e}+\frac{1}{t_g}\right)\left(\frac{1}{t_g}\right)^{\frac{1}{2}}\cdot\frac{1}{U} \tag{5.11.9}$$

此式是动态(非平衡)法测油滴电荷的公式.

下面导出静态(平衡)法测油滴电荷的公式. 调节平行板间的电压，使油滴不动，$v_e=0$，即 $t_e\to\infty$，由(5.11.9)式可得

$$q = K\left(\frac{1}{t_g}\right)^{\frac{3}{2}}\cdot\frac{1}{U}$$

即

$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}}\left[\frac{\eta l}{t_g\left(1+\dfrac{b}{pa}\right)}\right]^{\frac{3}{2}}\cdot\frac{d}{U} \tag{5.11.10}$$

上式即为静态法测油滴电荷的公式.

为了求电子的电荷 e，对实验测得的各个电荷 q 求最大公约数，就是基本电荷 e 的值. 也可测得同一油滴所带电荷的改变量 Δq_1（可用紫外线或放射源照射油滴，使其电荷改变）这时 Δq_1 应近似为某一最小单位的整数倍，此最小单位即为基本电荷 e.

【实验器材】

OM498B 油滴仪主要由油滴盒、CCD 电视显微镜、电路箱、监视器等组成.

(1) 油滴盒的结构见图 5.11.3.

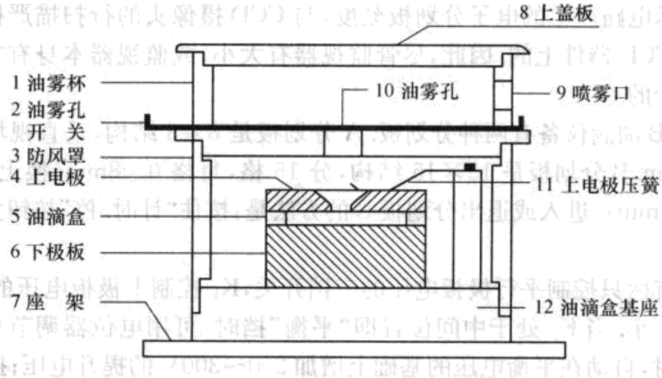


图 5.11.3 油滴仪样品室结构示意图

如图 5.11.3 所示，上、下电极用精加工的平板垫在胶木圆环上，这样，极板间的不平行度、极板间的间距误差都可以控制在 0.01mm 以内. 在上电极板中心有一个 0.4mm 的油雾落入孔，在胶木圆环上开有显微镜观察孔、照明孔和一个备用孔. 备用孔为采用紫外线等手段改变油滴带电量时使用. 在油滴盒外套有防风罩，罩上放置一个可取下的油雾杯，杯底中心有一个落油孔及一个挡片，用来开关落油孔. 在上电极板上方有一个可以左右拨动的压簧(注意：只有将压簧拨向最边上位置，方可取上极板). 照明灯安装在照明座中间位置，照明光路与显微光路间的夹角为 150°～160°，油滴的像特别明亮. 油滴仪采用带聚光的半导体发光器件，使用寿命长.

(2) CCD 电视显微镜的光学系统是专门设计的，体积小巧，成像质量好. 由于 CCD 摄像头与显微镜是整体设计，无须另加连接圈就可以方便地拆装，使用可靠.

(3) 电路箱体内装有高压产生、测量显示等电路，底部装有三只调平手轮，面板结构见图 5.11.4.

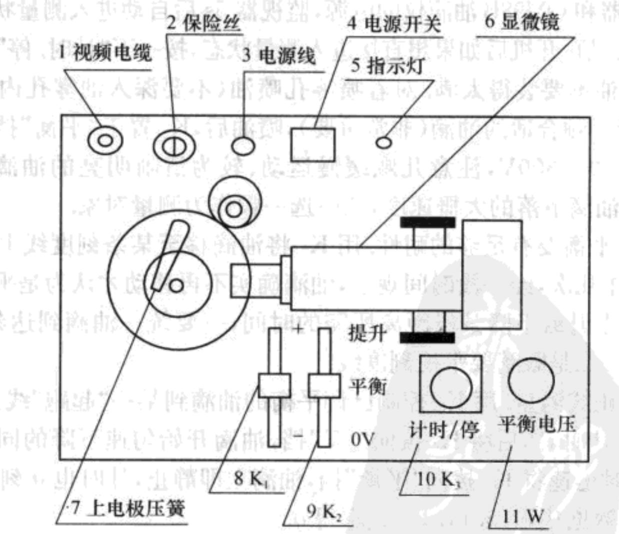


图 5.11.4 油滴仪面板图

由测量显示电路产生的电子分划板刻度，与 CCD 摄像头的行扫描严格同步. 相当于刻度线是做在 CCD 器件上的. 因此，尽管监视器有大小，或监视器本身有非线性失真，但刻度值是不会变的.

(4) OM98B 油滴仪备有两种分划板. A 分划板是 8×3 结构，垂直视场为 2mm，分 8 格，每格 0.25mm. B 分划板是 15×15 结构，分 15 格，每格 0.08mm(换上高倍显微物镜后，每格为 0.04mm). 进入或退出分划板 B 的方法是：按住"计时/停"按钮大于 5s，即可切换分为板.

在面板上有两只控制平行极板电压的三挡开关，K_1 控制上极板电压的极性，K_2 控制极板上电压的大小. 当 K_2 处于中间位置即"平衡"挡时，可用电位器调节平衡电压；当它拨向"提升"挡时，自动在平衡电压的基础上增加 200～300V 的提升电压；拨向"0V"挡时，极板上电压为 0V.

为了提高测量精度，油滴仪将 K_2 的"平衡"挡、"0V"挡与计时器的"计时/停"联动. 在 K_2 由"平衡"拨向"0V"、油滴开始匀速下落的同时开始计时. 油滴下落到预定的距离时，迅速将 K_2 由"0V"挡拨向"平衡"挡，油滴停止下落的同时停止计时. 屏幕上显示的是油滴实际运动距离及对应的时间，并提供了修正参数. 这样可提高测距、测时精度. 根据不同的教学要求，也可以不联动，拔去 K_2 的一个插头即可.

油滴仪的计时器采用"计时/停"方式，即按下开关，清零的同时立即开始计数；再按一下，停止计数，并保存数据.

【实验内容】

(1) 将面板上最左边带有 Q9 插头的电缆线接至监视器后背下部的插座上，监视器阻抗选择开关一定要在 75Ω 处.

(2) 调节仪器底座上的三只调平手轮，将水泡水平仪调平.

(3) 打开监视器和 OM98B 油滴仪的电源，监视器 5s 后自动进入测量状态，显示出标准分划板刻度线及 v、s 值. 开机后如果想直接进入测量状态，按一下"计时/停"按钮即可.

(4) 喷雾器内油不要装得太满. 对着喷雾孔喷油(不要深入油雾孔内，防止大颗粒油堵塞落油孔). 选择一颗合适的油滴(非常重要)，喷油后，K_2 置于"平衡"挡，K_1 置于"+". 调节平衡电压为 200～300V，注意几颗缓慢运动、较为清晰明亮的油滴. 试将 K_2 置于"0V"挡. 观察各颗油滴下落的大概速度，从中选一颗作为测量对象.

判断油滴是否平衡要有足够的耐性. 用 K_2 将油滴移至某条刻度线上，仔细调节平衡电压，这样反复操作几次，经一段时间观察，油滴确实不再移动才认为是平衡了.

(5) 测准油滴上升或下降某段距离所需的时间，一要统一油滴到达刻度线什么位置才认为油滴"踏线"，二是眼睛要平视刻度线.

(6) 用平衡法正式测量. 用 K_2 控制已调平衡的油滴到某一"起跑"线上，按 K_3(计时/停)，让计时器停止计时，然后将 K_2 拨向"0V"挡，油滴开始匀速下降的同时，计时器开始计时，到"终点"线时迅速将 K_2 拨向"平衡"挡，油滴立即静止，计时也立刻停止.

(7) 将测得的数据代入(5.11.10)式求得 q.

(8) 重复测量 5～10 次，求得油滴的 $\bar{q}$.

(9) 选择 10～20 颗油滴,求得各颗油滴的 q 值.

(10) 通过数据处理,求出电子电量 e.

【数据处理】

在(5.11.10)式中 $a=\sqrt{\dfrac{9\eta l}{2\rho g t_g}}$,油的密度 $\rho=981\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$(20℃),重力加速度 $g=9.79\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$(武汉),空气黏滞系数 $\eta=1.83\times10^{-5}\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,油滴匀速下降距离 $l=1.5\times10^{-3}\text{m}$;修正常数 $b=8.233\times10^{-3}\text{m}\cdot\text{Pa}$,标准大气压强 $p=1.013\times10^{5}\text{Pa}$,平行极板间距离 $d=5.00\times10^{-3}\text{m}$. 式中的时间 t_g 应为测量数次时间的平均值,实际大气压可由气压表读出.

计算出各油滴的电荷后,求它们的最大公约数,即为基本电荷 e 值. 若求最大公约数有困难,可用作图法求 e 值. 设实验得到 m 个油滴的带电量分别为 $q_1, q_2, \cdots, q_m$,由于电荷的量子化特性,应有 $q_i=n_i e$,此为一直线方程,n 为自变量,q 为因变量,e 为斜率. 因此油滴对应的数据在 n-q 坐标中,将在同一条过圆点的直线上,若找到满足这一关系的直线,就可用斜率求得 e 值. 将 e 的实验值与公认值再比较,求出相对误差(公认值 $e=-1.6\times10^{-19}\text{C}$).

【注意事项】

(1) 喷雾器内的油不可装得太满,否则会喷出很多"油"而不是"油雾"堵塞电极的落油孔. 每次实验完毕应及时擦拭油雾室内的积油!

(2) 喷油时喷雾器的喷头不要深入喷油孔内,防止大颗粒油滴堵塞落油孔.

(3) 喷雾器的气囊不耐油,实验后,将气囊与金属件分离保管好,可延长使用寿命.

(4) 油滴仪的电源保险丝的规格是 0.75A. 如需打开机器检查,必须拔下电源插头后再进行.

【预习思考】

(1) 对实验结果造成影响的主要因素有哪些?

(2) 如何判断加油盒内平衡极板是否水平? 不水平对实验结果有何影响?

【习题】

(1) 用 CCD 成像系统观测油滴比直接从显微镜中观测有何优点?

(2) 为什么必须使油滴做匀速运动或静止? 实验中如何保证油滴在测量范围内做匀速运动?

实验 5.12 法布里-珀罗干涉仪

法布里—珀罗干涉仪(简称 F-P 干涉仪)是一种应用多光束干涉原理制成的高分辨率光谱仪器. 它具有很高的分辨本领和集光本领,因此,常用于分析光谱的超精细结构,研究光的塞曼效应和物质的受激布里渊散射,精确测定光波波长和波长差,以及激光选模等

工作中.

【实验目的】

(1) 了解 F-P 干涉仪的结构、原理及基本特性.

(2) 学习 F-P 干涉仪的调节技术.

(3) 用 F-P 干涉仪做某些光学测量.

【实验器材】

F-P 干涉仪、钠光灯、高压汞灯、消色差透镜(或照相机镜头)、绿色干涉滤光片(546.1nm)、读数显微镜、望远镜、F-P 标准具等.

【实验原理】

1. 仪器的基本结构及工作原理

F-P 干涉仪主要由平行放置的两块平面玻璃板构成(图 5.12.1). 两块玻璃板 G_1、G_2 相对的内表面有极高的平面度(一般要求表面上各处距理想平面的误差不得超过$\lambda/40$),两内表面上各自镀有反射率很高的金属膜层或多层介质膜. 为了避开 G_1、G_2 板未镀膜外表面上反射光产生的干扰,两块板都做成稍微有点楔形(楔角一般约为 $5'\sim30'$). 使用时可利用每块板外套压圈上的三个螺钉(图中未画出),将两块板相对的内表面调成相互平行,在两内表面间形成一平行平面空气层. 如果两板内表面的间距是固定的,则称为 F-P 标准具;若 G_1、G_2 的间距可变,则称为 F-P 干涉仪.

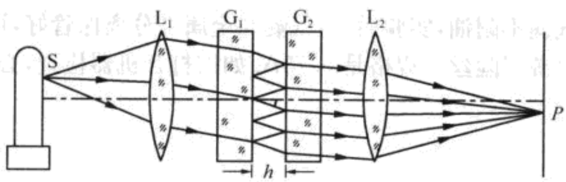


图 5.12.1

本实验的 F-P 干涉仪由迈克耳孙干涉仪(参看实验 4.8)改装而成. G_2 位置固定,G_1 位置可动(转动粗调或微调手柄,使 G_1 沿精密导轨前后移动),以改变 G_1、G_2 内表面的间距. G_2 右侧还有两个微调螺丝,以微调 G_2 的方位.

如图 5.12.1 所示,单色的扩展光源位于透镜 L_1 的物方焦面上,光源上某点 S 发出的光经 L_1 后成为平行光以小角度入射到板上,在两板镀层平面间来回多次反射和透射,分别形成一系列反射光束(图中未画出)及透射光束,这一系列相互平行并有一定光程差的透射光束经透镜 L_2 会聚,在 L_2 的像方焦面上发生多光束干涉.

在透射的诸光束中,相邻两光束的光程差为

$$\Delta = 2nh\cos i' \tag{5.12.1}$$

相应的位相差为

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} nh\cos i' \tag{5.12.2}$$

式中，h 为 G_1、G_2 镀层平面的间距，n 是两镀层平面间物质的折射率(现为空气，$n=1$)，i' 为在两镀层平面间反射光与平面法线的夹角.

当相邻两光束的光程差为波长的整数倍时产生干涉极大值(亮纹)

$$2nh\cos i' = k\lambda \tag{5.12.3}$$

这些条纹的形状与迈克耳孙干涉仪产生的等倾条纹相似，也是同心圆环，每个亮环各对应一定的倾角 i'. 但由于迈克耳孙干涉仪是两光束干涉，而 F-P 干涉仪是多光束干涉，所以后者的亮环比前者细锐. 条纹细锐的程度常用半值角宽度来衡量. 第 k 级亮纹的半值角宽度为

$$\Delta i_k = \frac{\lambda}{2\pi nh\sin i_k}\cdot\frac{1-R}{\sqrt{R}} \tag{5.12.4}$$

式中，R 为两板内表面反射膜的反射率. 由(5.12.4)式可见，反射率 R 越接近于 1，两板内表面间距 h 越大，Δi_k 就越小，亮纹就越细锐.

2. F-P 干涉仪的基本特性

(1) 角色散本领

$$D_\lambda = \frac{\mathrm{d}i'}{\mathrm{d}\lambda} = -\frac{1}{\lambda\tan i'} \tag{5.12.5}$$

表示波长差 0.1nm 的两谱线分开的角距离.

(2) 色分辨本领

$$A = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{2\pi h\sqrt{R}}{\lambda(1-R)} \tag{5.12.6}$$

$\Delta\lambda$ 是两个刚刚能被分开的细圆条纹的波长差，常称 $\Delta\lambda$ 为该仪器可分辨的最小波长差.

(3) 自由光谱范围

$$\Delta\lambda_R = \frac{\lambda^2}{2nh} \tag{5.12.7}$$

表示入射光的波长在 λ_0 到 $\lambda_0+\Delta\lambda$ 范围以内，所产生的干涉圆环不发生越级重叠时，所允许的最大波长范围 $\Delta\lambda$. 自由光谱范围 $\Delta\lambda_R$ 是 F-P 干涉仪的重要参量，使用时应先估计光源的单色性是否在仪器的自由光谱范围之内.

F-P 干涉仪 G_1、G_2 镀层的反射率 R 很高，亮纹非常细锐，而且当 G_1、G_2 间距 h 较大时，角色散大，分辨本领高. 但自由光谱区 $\Delta\lambda_R$ 小，表明 F-P 干涉仪的研究对象只能在很窄的光谱范围内，此时应采用滤光器或其他分光仪器作为前置滤波，以便把分离出来的较窄波段的光投射到 F-P 干涉仪上.

3. 用 F-P 干涉仪(或 F-P 标准具)测光波波长差(或波长)

若待测光源中包含有两个波长十分接近的光谱成分，其值分别为 λ 和 $\lambda+\Delta\lambda$，$\Delta\lambda\leqslant\Delta\lambda_R$，则处于 F-P 干涉仪的自由光谱范围内. 用焦距为 f 的消色差透镜，将 F-P 干涉仪的干涉条纹成像在后焦面上，获得一组同心圆环，每个亮环对应一定的倾角 i'，干涉亮环的直径 D 和倾角 i'有如下关系：

$$\cos i' = f\Big/\sqrt{f^2+\left(\frac{D}{2}\right)^2} \approx 1-\frac{D^2}{8f^2} \tag{5.12.8}$$

将(5.12.8)式代入(5.12.3)式,当 $n=1$ 时,可得

$$k\lambda = 2h\left(1-\frac{D^2}{8f^2}\right) \tag{5.12.9}$$

令 D_k、D_{k-1} 表示对应于波长为 λ 的第 k 级和 $k-1$ 级的环直径,由上式得

$$k\lambda = 2h\left(1-\frac{D_k^2}{8f^2}\right)$$

$$(k-1)\lambda = 2h\left(1-\frac{D_{k-1}^2}{8f^2}\right)$$

两式相减得

$$\lambda = \frac{h(D_{k-1}^2 - D_k^2)}{4f^2} \tag{5.12.10}$$

因此,若 F-P 标准具的间距 h 和透镜焦距 f 已知,则只要测得该波长相邻级次两干涉圆环的直径平方差 $D_{k-1}^2 - D_k^2$,即可求得波长 λ.

若令 D_n 和 D'_n 表示对应于波长为 λ 和 $\lambda+\Delta\lambda$ 的同一级(级数为 k_n)干涉环的直径,由(5.12.9)式可得

$$\lambda = \frac{2h}{k_n}\left(1-\frac{D_n^2}{8f^2}\right)$$

$$\lambda+\Delta\lambda = \frac{2h}{k_n}\left(1-\frac{D_n'^2}{8f^2}\right)$$

两式相减得

$$\Delta\lambda = \frac{2h}{k_n}\left(\frac{D_n^2 - D_n'^2}{8f^2}\right) \tag{5.12.11}$$

在我们的实验条件下,k_n 是一个很大的数,且测量时只测中心附近若干环的直径,故 k_n 变化不大,可近似用中心亮环的级数代替. 故有

$$2h = k_n\lambda$$

将其代入(5.12.11)式,得

$$\Delta\lambda = \lambda\left(\frac{D_n^2 - D_n'^2}{8f^2}\right) \tag{5.12.12}$$

若 F-P 间隔 h 已知,则将(5.12.10)式代入(5.12.12)式得

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2h}\left(\frac{D_n^2 - D_n'^2}{D_{k-1}^2 - D_k^2}\right) \tag{5.12.13}$$

式中,$(D_n^2 - D_n'^2)$为同一干涉级不同波长所对应的干涉环的直径平方差,$(D_{k-1}^2 - D_k^2)$是同一波长相邻级次两干涉环的直径平方差.

【实验内容】

1. 调节 F-P 干涉仪获得等倾干涉条纹

以钠光灯扩展光源照明 F-P 干涉仪,取 G_1、G_2 两内表面间距 h 约为 5mm. 在 G_1 前立一小针,用眼睛接受透射光,通过 F-P 观察小针经 F-P 多次反射后形成的一系列像. 仔细调节 G_1、G_2 外套压圈上的 6 个螺钉,使所有针像完全重合,这时可看到干涉条纹. 再仔

细地调节 G_2 右侧的两个微调螺丝，使干涉环呈圆形且清晰，直到眼睛上下、左右移动时，各圆的大小基本不变，且圆环整体随眼移动.

在钠光灯和干涉仪间加入透镜 L_1，使灯大致位于 L_1 的焦面上，将小针移出光路，用望远镜观察等倾条纹，调节 G_2 的两个微调螺丝，从望远镜中看到清晰的干涉圆环.

2. 观察钠黄双线的精细结构及测量钠黄光的波长差

(1) 仍用钠光灯作光源. 首先观察干涉亮环的细锐程度，将观察到的干涉图样与迈克耳孙干涉仪等倾条纹进行比较，分析条纹锐度与什么因素有关?

(2) 再仔细看，是否有两套同心亮圆环? 说明钠黄双线是否被分开? 然后顺时针缓慢移动粗调手轮，改变 G_1 与 G_2 的间距，观察两套同心亮环间相对移动的情况，试加以解释.

提示：当 $k_1\lambda_1=(k_2+1/2)\lambda_2$ 时，一套圆环位于另一套圆环的中间位置. 当 $k_1\lambda_1=k_2\lambda_2$ 时，只有一套同心圆环.

(3) 顺时针缓慢转动粗调手轮，改变 G_1 与 G_2 的间距，观察干涉条纹的间距、条纹的锐度与 h 的关系.

(4) 根据由(2)所观察到的现象，设计一种测量钠黄双线波长差的方法，然后测量出结果，并与实验4.8中用迈克耳孙干涉仪测量的方法进行分析比较.

3. 用F-P干涉仪测光波波长

自行设计实验方案，用F-P干涉仪测定汞灯加滤光片(546.1nm)后的光波波长. 实验室提供高压汞灯、钠光灯、干涉滤光片(546.1nm)、消色差透镜、读数显微镜.

4. 测量F-P标准具的间距 h

实验室有一旧标准具，其标签上的参量 $R=80\%$，而 h 已模糊不清，请设计一实验方案，测量此标准具的间距 h. 实验室提供钠光灯、消色差透镜、读数显微镜.

【习题】

(1) 为什么F-P干涉仪的分辨本领和测量精度比迈克耳孙干涉仪高?

(2) F-P干涉仪中，设反射率 $R=80\%$，当 G_1、G_2 的间距 $h=2\text{mm}$ 时，试估算钠黄双线能否被分开. 若能分开，那么被分开的钠黄双线的两套亮环发生越级重叠了吗?

实验5.13　单色仪及其使用

单色仪是一种利用色散元件把复色光分解为准单色光的光谱仪器，可用于各种光谱特性的研究，如测量介质的光谱透射率、光源的辐射能量分布以及光电探测器的光谱响应等. 单色仪还是其他光谱仪器(如分光光度计等)的主要组成部分之一. 本实验学习单色仪的定标方法并用单色仪测定滤光片的透射率曲线.

【实验目的】

(1) 了解单色仪的工作原理.

(2) 掌握单色仪的定标方法，学会正确使用单色仪.

(3) 用单色仪测定滤光片(或介质膜片)的透射率曲线.

【实验器材】

反射式棱镜单色仪、汞灯、氦灯及电源(霓虹灯变压器 12 000V/220V、调压变压器)、溴钨灯(12V/50W)及低压电源变压器、读数显微镜、硒光电池、光点检流计、会聚透镜、待测滤光片(或介质膜片)、照明小灯.

【仪器介绍】

常用的单色仪有：棱镜单色仪(反射式或透射式)和光栅单色仪.

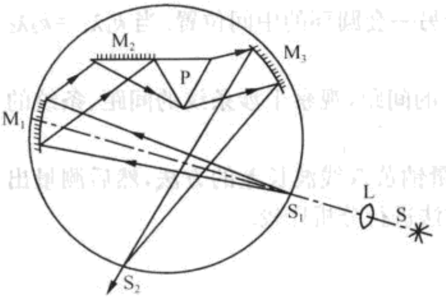


图 5.13.1

本实验采用国产 WDF 型反射式棱镜单色仪，光路如图 5.13.1 所示. 它的光学系统主要由三部分组成

(1) 入射准直系统. 由入射狭缝 S_1 和准直物镜(凹面反射镜)M_1 组成. S_1 的缝宽可以调节.

(2) 色散系统. 该单色仪采用瓦兹渥斯(Wadsworth)色散装置(见附录)，色散元件是棱镜 P. 棱镜材料为 ZF-1(重火石)玻璃，适用波段为 370～700nm.

(3) 出射聚光系统. 由聚光物镜(凹面反射镜)M_3 及出射狭缝 S_2 组成. S_2 的缝宽也可以调节. S_1 和 S_2 两缝宽的数值可由各自的调节鼓轮上的刻度值读出.

由光源 S 发出的光经透镜 L 照亮狭缝 S_1 并射向准直物镜 M_1，经 M_1 反射后成为平行光射向平面反射镜 M_2，M_2 反射后仍为平行光投向棱镜 P，由于棱镜的色散作用，各种色光按波长展开为各个方向的平行光. 波长长的偏向角小些，波长短的偏向角大些，相同波长的一组平行光再经聚光镜 M_3 反射后会聚成一个狭缝像(S_1 的像)，各种不同波长光的狭缝像依次排列在 M_3 的焦面上，出射缝 S_2 就位于这个曲面上. M_2 和 P 可以一起绕通过棱镜底边中点的转轴转动，随着它们的转动，以最小偏向角从棱镜出射的不同波长的单色光将依次从出射狭缝 S_2 射出.

棱镜的转动由仪器底部的鼓轮来调节，鼓轮与万向接头转动杆及手把相连，鼓轮读数与棱镜转动位置相对应，也与出射光的波长相对应. 只要读出鼓轮读数 N 就知道了所对应的出射光的波长 λ.

5.13.1 单色仪的定标

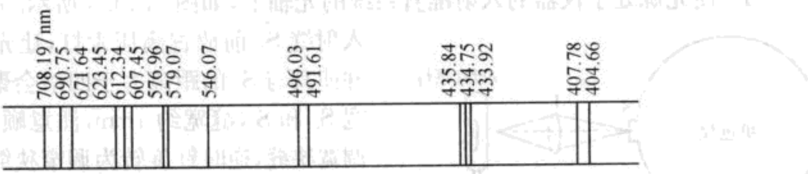
【实验原理】

单色仪的鼓轮刻度与光谱波长的对应曲线，称为单色仪的定标曲线(又称色散曲线). 单色仪出厂时，一般都附有定标曲线的数据，但是经过长期使用或重新装调后，其数

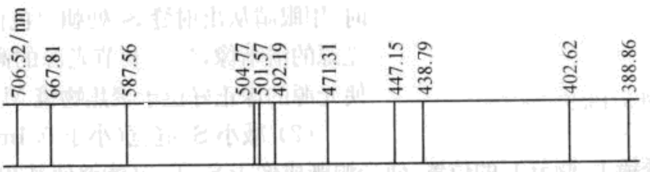
据会发生变化，这就需要重新定标，以对原数据进行校准并作出校准好的定标曲线.

定标曲线的制作是借助于已知线光谱光源来进行的. 通常采用汞灯、氢灯、钠灯、氦灯以及用铜、锌、铁做电极的弧光光源等.

本实验选用汞灯和氦灯作已知线光谱的光源，在可见光区域(400.0～760.0nm)进行定标，用读数显微镜观察出射谱线. 在可见光波段，汞灯和氦灯的主要谱线的波长、它们之间的相对间距和强度如图 5.13.2 及表 5.13.1 所示.



(a) 汞灯主要谱线的波长和相对间距示意图



(b) 氦灯主要谱线的波长和相对间距示意图

图 5.13.2

表 5.13.1 汞灯、氦灯主要谱线的波长和相对强度

颜色[①]	汞灯		氦灯	
	波长(nm)	相对强度[②]	波长(nm)	相对强度
紫	404.66	强	388.86	强
	407.78	强	402.62	弱
蓝	433.92	弱	438.79	弱
	434.75	弱	447.15	强
	435.84	很强		
青	491.61	弱	471.31	弱
	496.03	弱		
绿			492.19	弱
			501.57	强
	546.07	很强	504.77	弱
黄	576.96	强		
	579.07	强	587.56	很强
橙	607.27	弱		
	612.34	弱		
	623.45	强		
红	671.64	弱	667.81	强
	690.75	弱	706.52	强
	708.19	弱		

注：① 光的各种颜色之间没有断然的分界线，它是随波长逐渐变化的，表中横格只具有相对的意义.

② 相对强度是对同种颜色的谱线相比较而言的，供识别谱线时参考.

【实验内容】

1. 调整光源

要求光源经会聚透镜 L 所产生的会聚光束的立体角与单色仪入射准直系统的相对孔径相匹配，以获得充分的照明和减少仪器内部的杂散光（WDF 型单色仪的准直反射镜的相对孔径为 1∶7，焦距为 342mm）. 调节方法是：

(1) 使光源处于仪器的入射准直系统的光轴上，如图 5.13.3 所示. 先不放透镜 L，在入射缝 S_1 前放置高压汞灯，让光源直接照射 S_1，并使其与 S_1 的距离大于四倍会聚透镜的焦距. 调宽 S_1 和 S_2（缝宽约 1mm，注意顺时针旋转鼓轮为调宽狭缝，逆时针旋转为调窄狭缝，调节时动作要轻要慢，切不可使狭缝读数为零甚至小于零）. 这时，用眼睛从出射缝 S_2 处朝单色仪内观察，可看到光源的清晰像，然后调节光源的高低及左右位置，使光源的像正好位于聚焦物镜 M_2 的中央.

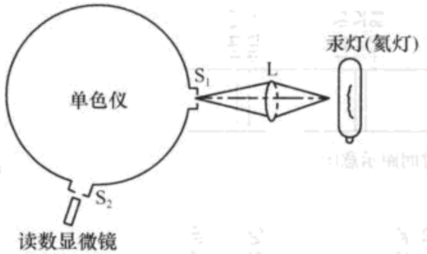


图 5.13.3

(2) 减小 S_1 缝宽（小于 0.1mm），在光源与 S_1 之间放入会聚透镜 L. 调节 L 的位置，使光源既成像于 S_1 上，又能够使其相对孔径与入射准直系统的相对孔径相等. 这时用半透明纸贴近 S_2 处，微调 L，使得纸上呈现的谱线最明亮.

2. 定标

(1) 置读数显微镜于出射缝 S_2 前，对 S_2 缝的刀口进行调焦，使视场中观察到清晰的汞谱线. 调节显微镜十字丝的竖线位于 S_2 缝的中心. 调好后显微镜的位置不再移动.

(2) 调缝宽. 调节 S_1 的宽度，使谱线尽量细锐（汞灯黄双线要明显分开）并有足够的亮度. S_2 缝可开得宽一些（如 1mm 左右），以便能同时看到 2～4 条谱线.

(3) 辨认谱线. 旋转读数鼓轮，从红光到紫光再从紫光到红光，观察高压汞灯的所有谱线，根据汞灯光谱线的颜色、相对强度和间距，辨认谱线，认准后方可进行定标.

(4) 定标测量. 朝一个方向缓慢转动读数鼓轮，将红光到紫光（或由紫光到红光）的各条谱线引出，并使每条谱线依次对准显微镜的叉丝竖线，分别记下鼓轮读数 N 和所对应的谱线波长 λ.

(5) 移开汞灯，换上氦灯，L 的位置不变，使氦灯经 L 成像于 S_1 处. 保持显微镜的位置不动，重复步骤(3)、(4)，测出氦灯各谱线波长 λ 与其对应的鼓轮读数 N.

(6) 以 N 为纵坐标，λ 为横坐标，在坐标纸上绘制出曲线，即得定标曲线. 有了该曲线后，便可方便地由鼓轮读数给出任意出射光的波长值.

5.13.2 制作 $\Delta\lambda/\Delta S_2$-λ 曲线

【实验原理】

单色仪的基本特性是单色度（即单色光的光谱宽度）和出射光的强度大小. 这两点是

相互制约的，出射光单色性越好，光强越弱. 单色仪出射的光不是绝对单色的，总有一定的波长间隔 $\Delta\lambda$. 对某一单色仪来说，出射光的波长间隔 $\Delta\lambda$ 主要由 S_1 和 S_2 的缝宽来决定. 由于棱镜的色散曲线不是线性的，即棱镜的线色散 $\Delta\lambda/\Delta S_2$（单位为 $nm \cdot mm^{-1}$，表示在出射缝 S_2 处 1mm 的距离内包含若干 nm 的波长）与波长有关，因此在测量谱线强度时，必须知道 $\Delta\lambda/\Delta S_2$-λ 曲线，从而在不同的波长下，正确选取出射缝 S_2 的宽度，以便在该宽度下出射的单色光既不影响测量精度，又能有一定的光强输出，以利于探测器的接收.

【实验内容】

(1) 实验装置如图 5.13.3 所示. 在高压汞灯的光谱线中，选取一系列两条靠近的谱线作为线对（线对的波长差为 $\Delta\lambda$），如表 5.13.2 所示.

表 5.13.2

颜色	线对/nm	平均波长/nm
紫	404.66 和 407.78	406.22
蓝	433.92 和 435.84	434.88
青	491.60 和 496.03	493.82
黄	576.96 和 579.07	578.02
橙	612.35 和 623.44	617.90
红	671.64 和 690.75	654.20

(2) S_1 和 S_2 的缝宽与实验内容 5.13.1 中要求相同.

(3) 用读数显微镜看清楚其中一组线对，并测量出该线对的间距，这个间距就可认为是当入射光的波长间隔为 $\Delta\lambda$ 时，出射狭缝应具有的宽度 ΔS_2. 缓慢地单方向转动读数鼓轮，依次测量出各组线对的间距. 然后做出 $\Delta\lambda/\Delta S_2$-λ 曲线.

5.13.3　测定滤光片（或介质膜片）的光谱透射率曲线

【实验原理】

一束波长为 λ 的单色光垂直入射到一透明物体上，设入射光强为 $I_0(\lambda)$，透射光强为 $I(\lambda)$，则物体的透射率定义为

$$T(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} \tag{5.13.1}$$

物体的透射率 $T(\lambda)$ 是波长 λ 的函数. 若需测定某物体的 $T(\lambda)$—λ 曲线（即光谱透射率曲线），通常以白炽灯为光源，将被测样品插入单色仪的入射缝 S_1 前的光路中，出射单色光由光电池接收，并用光点检流计测量光电流值.

当待测样品未插入光路时，由出射缝 S_2 射出的单色光所产生的光电流 $i_0(\lambda)$ 与入射光强 $I_0(\lambda)$、单色仪的光谱透射率 $T_0(\lambda)$ 和光电池的光谱灵敏度 $S(\lambda)$ 成正比，即

$$i_0(\lambda) = kI_0(\lambda)T_0(\lambda)S(\lambda) \tag{5.13.2}$$

式中，k 为常数. 若将一光谱透射率为 $T(\lambda)$ 的待测样品插入光路中，则相应的光电流 $i(\lambda)$

可表示为

$$i(\lambda)=kI(\lambda)T_0(\lambda)S(\lambda)=kI_0(\lambda)T(\lambda)T_0(\lambda)S(\lambda) \tag{5.13.3}$$

由(5.13.2)式、(5.13.3)式得

$$T(\lambda)=\frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)}=\frac{i(\lambda)}{i_0(\lambda)} \tag{5.13.4}$$

转动单色仪读数鼓轮，测量不同波长下的 $i(\lambda)$ 和 $i_0(\lambda)$ 的值，即可做出 $T(\lambda)$-λ 曲线.

【实验内容】

实验装置如图 5.13.4 所示．用溴钨灯作光源(其发射光谱为连续光谱)，在可见光区域测定滤光片(或介质膜片)的光谱透射率曲线.

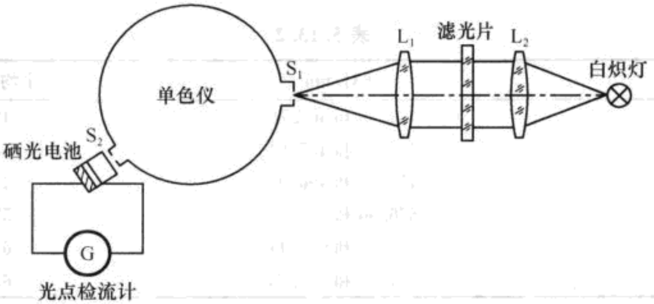


图 5.13.4

(1) 按图 5.13.4 布置好实验装置，选取适当的缝宽(约 0.1mm).

(2) 遮挡光源，将光电接收器盒套在出射缝 S_2 上，将检流计的选择开关放在×1 挡，仔细把检流计零点调到左端(或右端)60 格处.

(3) 将待测样品安置在有圆孔的滑块上，然后再插入光路中. 先使样品移出光路，转动读数鼓轮，粗看一下检流计偏转格数随波长 λ 变化的情况；再将样品推入光路，转动读数鼓轮，观察样品对不同波长光的透过情况，以便考虑选择适当的测量范围及测量间隔(如读数鼓轮每转 5 小格测一个点).

(4) 测量. 依次按一个方向(从红光区至紫光区或反之)转动读数鼓轮，按照所选择的间隔进行测量. 每次都记下读数鼓轮的刻度值 N，读出光束不经过样品的光电流 $i_0(\lambda)$ 和经过样品后的光电流 $i(\lambda)$ 值，利用(5.13.4)式计算样品对不同波长的光谱透射率 $T(\lambda)$，最后得到一组 $T(\lambda)$-N 的对应值.

(5) 由定标曲线查出对应 N 的波长值，做出被测样品的可见光范围内的光谱透射率曲线.

【注意事项】

(1) 可调入射狭缝和出射狭缝是单色仪的重要部件，若操作不当，极容易损坏. 调节时，动作要慢，切不可突然用力扭过零刻度.

(2) 光点检流计工作时，不要超过量程. 不测量时，应保持在短路状态.

(3) 光电池不能见强光，不用时要将它扣在桌子上.

(4) 氦灯系用 5000V 霓虹灯变压器供电，使用时应注意安全(该霓虹灯变压器规格为 12 000V/220V，为使输出 5000V，其输入端需接调压变压器后再接 220V 市电，调压变压器电压调节时不得超出 100V).

【习题】

(1) 正确使用单色仪应该做到哪几点?

(2) 为什么要对单色仪重新进行定标? 作定标曲线时，应选用多大的坐标纸作图才能反映所测数据的精度?

(3) 从单色仪出射的光是真正的单色光吗? 在出射缝的宽度不变时，出射的红光和紫光所包含的波长范围 $\Delta\lambda$ 是否相同?

(4) 测量滤光片的光谱透射率时，应该怎样选取测量点? 如何测定某待测样品的吸收曲线?

(5) 光电探测器输出光电流的大小与哪些因素有关? 在什么条件下光电流之比值等于照射光强的比值?

【附录】　瓦兹渥斯色散装置说明

如图 5.13.5 所示的色散装置称为瓦兹渥斯色散装置. 图中平面反射镜 M 和色散棱镜 P 组装成一整体，安装在同一转台上一起转动，转动轴就是棱镜顶角等分面与底边的交线(通过 O，垂直于图面). 随着棱镜的转动，以最小偏向角从棱镜出射的不同波长的光波，将依次从出射狭缝射出.

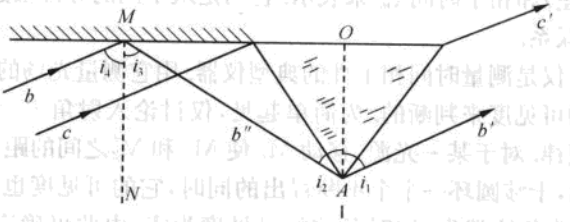


图 5.13.5

如图 5.13.5 所示，设光线 b' 是以最小偏向角由棱镜出射的，则光线 b'' 与 b' 相对 OA 是对称的，所以 $i_1=i_2$. 又因 $OA/\!/MN$，所以 $i_2=i_3$，而 $i_3=i_4$，故 $i_1=i_4$，即 $i_1+i_2=i_3+i_4$，所以光线 b 必平行于光线 b'. 也就是说，满足最小偏向角的光线通过这种色散装置后仍平行于原来的入射线，相互之间仅发生一定的平移. 这样的平行光经 M 会聚于出射缝上.

当棱镜和平面镜一起绕 O 转过 α 角时，整个装置如图 5.13.6 所示. 与光线 b 平行的光线 d 入射到 M′ 反射后，再入射到棱镜上，然后由 d' 光线射出. 因为 d 光线平行于 b 光线，d' 光线平行于 b 光线，所以 d' 光线平行于 d 光线，$i_4'+i_3'=i_2'+i_1'$. 因 $M'N'$ 为平面镜的法线，故有 $M'N'/\!/OA'$. 又因 $i_4'=i_3'$，$i'=i_2'$，故 $i_2'=i_1'$，即光线 d'' 与光线 d' 相对 OA' 是对称的，所以光线 d' 是以最小偏向角从棱镜射出的.

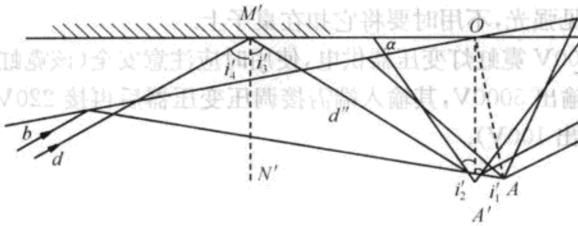


图 5.13.6

实验 5.14　光源的时间相干性与空间相干性

光源的相干程度用时间相干性和空间相干性来描述. 本实验通过测量几种光源的相干长度和观察光源宽度对干涉条纹可见度的影响, 进一步加深对光源的时间相干性和空间相干性的理解. 实验中, 为了测量几种光源的相干长度, 需要利用单色仪输出的准单色光来照明迈克耳孙干涉仪, 必须解决两种仪器如何对接的问题. 这是本实验是否成功的关键.

【实验原理】

1. 光源的时间相干性

光源的时间相干性, 可用谱线宽度 $\Delta\lambda$(定义为谱线强度的 1/2 处所对应的波长范围, 常称 $\Delta\lambda$ 为谱线的半值全宽度, 简称谱线宽度) 和最大光程差 ΔL_m 来表示, 也可用相干长度(等于最大光程差) 和相干时间 τ_m 来表示. 它们是从不同的方面描述了光源的时间相干性, 相互间有一定联系.

迈克耳孙干涉仪是测量时间相干性的典型仪器. 用它测量光场的最大光程差时, 通常是根据干涉条纹的可见度来判断的. 为简单起见, 仅讨论入射角 $i'=0$ 的情况, 即可观察圆环中心的变化规律. 对于某一光源, 移动 M_1 使 M_1 和 M_2'之间的距离 $d=0$, 再徐徐移动 M_1 镜, d 不断增加, 干涉圆环一个个不断冒出的同时, 它的可见度也随之变化. 当 d 增加到某一数 d' 时, 干涉条纹消失, 这时条纹的可见度为零. 由此可确定光源的最大光程差 $\Delta L_m=2d'$.

光源的时间相干性可以从光源发光的微观过程来说明. 原子的发光是断续的、无规则的, 发出的光波波列是有限长的, 非单色性的, 相应的对于某一确定的谱线, 就有一定的谱线宽度 $\Delta\lambda$, 以及使两列波(干涉仪的分束板将入射的一列波分解成的两列波) 能够产生干涉的最大光程差.

实际光源发出的光不可能是理想的单色光, 而只是接近于单色光波. 如果光波中包含的波长范围(谱线宽度 $\Delta\lambda$) 与中心波长 λ 相比很小, 即 $\Delta\lambda/\lambda\ll1$, 则这种光波称"准单色光". 例如, 汞绿光、钠黄光和 He-Ne 激光都是准单色光. He-Ne 激光的单色性越好, 就越接近理想的单色光.

设某一准单色光的中心波长为 λ_0, 谱线宽度为 $\Delta\lambda$. 该准单色光可视为由波长(λ_0 —

$\Delta\lambda/2$)到($\lambda_0+\Delta\lambda/2$)之间的、连续变化的光波组成. 每一波长的光都可产生一套干涉条纹,随着光程差 Δ 的增大,各个波长的干涉条纹逐渐错开,而合成干涉图样的对比度就越来越差,当($\lambda_0-\Delta\lambda/2$)和($\lambda_0+\Delta\lambda/2$)的光产生的干涉条纹错开一个条纹宽度,即($\lambda_0+\Delta\lambda/2$)的第 k 级亮纹与($\lambda_0-\Delta\lambda/2$)的第 $k+1$ 级亮纹重合时,就看不到干涉条纹,如图 5.14.1 所示. 这时,它们所对应的光程差 ΔL_m 叫做相干长度.

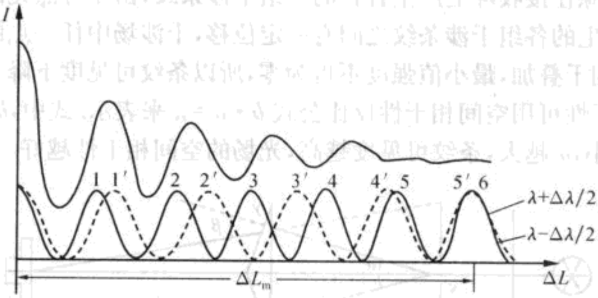


图 5.14.1

因为 $\Delta L_m=(k+1)(\lambda_0-\Delta\lambda/2)=k(\lambda_0+\Delta\lambda/2)$,而 $\lambda_0\gg\Delta\lambda$,所以可得

$$k=\frac{\lambda_0}{\Delta\lambda} \tag{5.14.1}$$

$$\Delta L_m=\frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} \tag{5.14.2}$$

由上两式可看出,$\Delta\lambda$ 越小,光源单色性越好,k 越大,所能观察到的干涉条纹级数就越多,相应的 ΔL_m 也就越大,相干长度就越长.

相干长度 ΔL_m 除以光速 c,是光走过这段长度所需要的时间,称为相干时间,用 τ_m 表示,故有

$$\tau_m=\frac{\Delta L_m}{c}=\frac{\lambda_0^2}{c\Delta\lambda} \tag{5.14.3}$$

He-Ne 激光的 $\Delta\lambda$ 很小,对 632.8nm 的谱线,$\Delta\lambda$ 只有 $10^{-4}\sim10^{-8}$nm,故相干长度是几米到几十公里的范围.

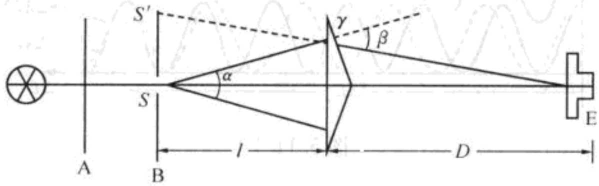
对于双线结构的光(如钠黄光和汞黄光),光源发出的光含有波长为 λ_1 和 λ_2 两条谱线,且两谱线的波长差($\lambda_2-\lambda_1$)$\ll\lambda_1$(或 λ_2),而每条谱线本身又有一定的谱线宽度 $\Delta\lambda$. 假如用这样的钠黄光去照明迈克耳孙干涉仪,则由于波长 λ_1 和 λ_2 分别产生一套自己的干涉条纹,而总强度是这两套条纹的非相干叠加,从而使得条纹的可见度随光程差做周期性变化. 等光程时条纹最清晰时,移动 M_1 镜增大光程差 ΔL 时,干涉条纹由清晰→模糊→清晰→模糊,条纹可见度呈周期性变化. 在多次出现可见度最小的现象之后,当再继续增大光程差时,这种周期性变化再也看不见了,可见度一直为零,此时对应的光程差为最大光程差 ΔL_{max},则称 ΔL_{max} 为钠黄光的相干长度.

白光可视为由可见光范围内所有不同波长的光的组合. 每一种波长都产生一套自己的干涉条纹,而总强度是各套干涉条纹的非相干叠加. 由于白光的 $\Delta\lambda$ 约为一个波长,从式(5.14.1)可知,能观察到的白光条纹级数约为 1~2 级.

2. 光源的空间相干性

我们知道，当用一个点光源照明迈克耳孙干涉仪时，可获得非定域的干涉条纹. 但若光源面积由点逐渐增大，干涉图样的可见度就逐渐减小. 如果在点光源前加入一块毛玻璃形成扩展光源，就只可能获得定域的干涉图样. 这是因为扩展光源可以看作由许多点光源所组成，每一点光源在接收屏上产生各自的一组干涉条纹，由于各点光源的位置和初相位各不相同，因而产生的各组干涉条纹之间有一定位移，干涉场中任一点的强度是各组干涉条纹在该点的非相干叠加，最小值强度不再为零，所以条纹可见度下降了.

光源空间相干性可用空间相干性反比公式 $b \cdot a = \lambda$ 来表示. 式中，b 为光源宽度，a 为相干孔径角. b 越小，a 越大，条纹可见度越高，光场的空间相干性越好.



A. 滤光片；B. 狭缝；E. 测微目镜

图 5.14.2

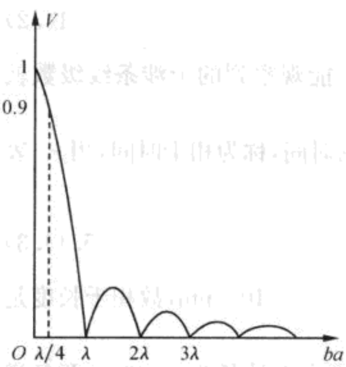


图 5.14.3

利用如图 5.14.2 所示的菲涅耳双棱镜装置，可以较好地观察到光源宽度、相干孔径角对光源空间相干性的影响. 图中，相干孔径角可表示为

$$a = \frac{D(n-1)\gamma}{l+D} \tag{5.14.4}$$

式中，γ 为双棱镜的顶角，n 为棱镜的折射率，l 为狭缝与双棱镜之间的距离，D 是双棱镜与测微目镜之间的距离.

那么，光源的临界宽度为

$$b = \frac{(l+D)\lambda}{D(n-1)\gamma} \tag{5.14.5}$$

图 5.14.3 是条纹可见度随光源宽度变化的曲线.

【实验器材】

迈克耳孙干涉仪、单色仪、透镜、双棱镜、测微目镜、光具座、红色干涉滤光片、高压汞灯、溴钨灯、白炽灯、He-Ne 激光器.

【实验内容】

1. 测量几种光源的相干长度

(1) 测量白光的相干长度. 以白炽灯作光源，将迈克耳孙干涉仪调出白光干涉条纹，找出白光条纹的对称中心，此处的条纹级数为零. 从零级条纹开始向一侧数，数出最大的

干涉级次. 估算白光的相干长度 $\Delta L_m = K_m\lambda$（取 $\lambda = 550\text{nm}$）.

(2) 测量溴钨灯和高压汞灯中绿光(546.1nm)的相干长度，并比较之.

① 作出单色仪的定标曲线和 $\Delta\lambda/\Delta s_2$-λ 曲线.

② 用溴钨灯照明单色仪的入射缝，以单色仪出射的绿光(546.1nm)做光源照亮迈克耳孙干涉仪，用等倾条纹来观测. 先用白光调出 $M_1M_2' = 0$（即等光程），记下 M_1 镜的位置 d_0，顺时针慢慢转动迈克耳孙干涉仪的粗调手轮，注意观察干涉条纹的清晰程度，直到看不见干涉条纹为止. 记下此时 M_1 镜的位置 d_m，计算出绿光的相干长度 $\Delta L_m = 2(d_m - d_0)$.

从单色仪定标曲线和 $\Delta\lambda/\Delta s_2$-λ 曲线中查出单色仪此时出射光准确的波长 λ 和谱线宽度 $\Delta\lambda$，用(5.14.2)式计算出 ΔL_m，并与测量值进行比较.

改变单色仪的出射缝宽 Δs_2，再测一次 $\Delta L_m'$，并与前一测量值 ΔL_m 进行比较，从中可得出什么结论？

③ 仍用上面的实验装置，更换光源，测量高压汞灯中绿光(546.1nm)的相干长度.

(3) 测量高压汞灯黄光的相干长度与高压汞灯黄双线的波长差，方法自拟.

2. 观察光源的空间相干性

(1) 用 He-Ne 激光作光源，并用一短焦距透镜将激光束会聚成点光源照明迈克耳孙干涉仪，调出等倾干涉条纹. 此时可用接收屏（或毛玻璃）接收到一组非定域的清晰条纹.

注意：前后移动屏的位置是否各处都能看到干涉条纹，条纹的可见度有没有变化？前后移动 M_1 镜，仔细观察条纹又有什么变化？若将一毛玻璃放在透镜与激光器之间，此时屏上能否接收到干涉条纹，为什么？

(2) 利用如图 5.14.2 所示的菲涅耳双棱镜装置，观察狭缝宽度、相干孔径角对干涉条纹可见度的影响.

将各光学元件置于光具座上并调节各元件等高共轴，在光源与狭缝之间插入红色干涉滤光片，调出干涉条纹. 固定狭缝到棱镜间的距离 l 以及棱镜到测微目镜的距离 D，改变狭缝宽度 b，观察条纹可见度随 b 变化的情况.

固定狭缝宽度 b，分别改变 l 和 D 的大小，观察条纹可见度的变化规律.

【思考题】

(1) 分别用汞绿光(546.1nm)和汞黄双线照明迈克耳孙干涉仪，条纹可见度随光程差将如何变化？两者有什么不同？为什么？

(2) 回答实验内容中提出的问题.

实验 5.15 等色谱及其应用

等色干涉属于薄膜干涉，是光波叠加引起强度在频谱空间的重新分布. 由等色干涉经过分光仪而产生的等色谱（槽沟谱）可以被用来测定未知光波的波长及薄膜的光学厚度，亦可用来定标单色仪等光谱仪器.

本实验要求在了解等色谱的形成原理和谱线特点的基础上，自行设计获得等色谱的实验装置；学习利用等色谱测量光波波长和定标单色仪的方法.

【实验原理】

1. 等色谱形成原理

如果让一束平行白光垂直入射到透明介质薄膜上，在薄膜上下表面产生反射和折射，仅考虑薄膜上的反射光，可按双光束干涉处理，则对于适合下列关系式的光波波长产生相消干涉：

$$2nd = m_1\lambda_1, \quad \text{暗带} \tag{5.15.1}$$

式中，m_1（干涉级次）为整数，d 为薄膜厚度，n 为薄膜折射率. 显然，当干涉级次不同时，其他波长也给出暗带，即

$$\left.\begin{aligned} 2nd &= m_2\lambda_2 \\ &\vdots \\ 2nd &= m_n\lambda_n \end{aligned}\right\} \tag{5.15.2}$$

当波长满足下列关系：

$$\left.\begin{aligned} 2nd &= (2m_1'+1)\frac{\lambda_1'}{2} \\ 2nd &= (2m_2'+1)\frac{\lambda_2'}{2} \\ &\vdots \\ 2nd &= (2m_n'+1)\frac{\lambda_n'}{2} \end{aligned}\right\} \tag{5.15.3}$$

时，产生相长干涉，光强极大. 经过分光元件的色散作用使得不同频率、不同强度的光在空间展开，形成按波长顺序排列的彩色条纹. 同一干涉级次的条纹是由波长相同的光形成的，故称为“等色干涉条纹”. 又因这种谱线是由连续分布的光谱上形成一条条“暗沟”所组成的，故又称这些暗带为“槽沟谱”(Channeled Spectrum).

必须指出，上述讨论中我们忽略了介质膜的色散作用. 严格说来，(5.15.1)式、(5.15.2)式和(5.16.3)式中的 n 对不同波长是不相同的，考虑到其差异较小，故近似认为折射率相同.

2. 等色谱测光波波长的方法

如图 5.15.1 所示，A 为等色谱，B 为波长值已知的比较谱，C 为待测谱线.

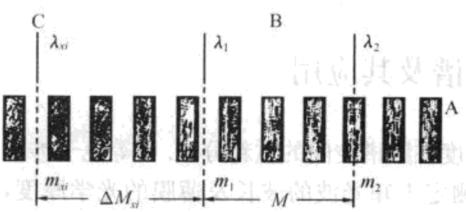


图 5.15.1

若已知谱线 λ_1、λ_2 所对应的等色谱的干涉级次分别为 m_1、m_2，令

$$M = m_1 - m_2 \tag{5.15.4}$$

M 为干涉级次差. 由(5.15.1)式、(5.15.2)式和(5.15.4)式可得

$$m_1 = \frac{M\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \tag{5.15.5}$$

因此，只要用测微目镜测出两谱线对应的等色谱的干涉级次差 M，即可由(5.15.5)式计算出 m_1. 显然，一旦任一等色谱暗带的干涉级已知，就可从已知暗带简单地数条纹数目而找出其他暗带的级次.（思考：由红向蓝移动，干涉级次是增加还是减少?）

设待测谱线 λ_{xi} 相对应的等色谱(暗带)干涉级次为 m_{xi}，则

$$m_{xi} = m_1 \pm \Delta m_{xi}$$

Δm_{xi} 由测微目镜直接测量. 当 $\lambda_{xi} < \lambda_1$ 时，上式取正号；当 $\lambda_{xi} > \lambda_1$ 时，上式取负号，即可得出待测谱线波长为

$$\lambda_{xi} = \frac{m_1 \lambda_1}{m_{xi}} \tag{5.15.6}$$

注意：上面的 m_1、m_2、M 和 m_{xi} 均有可能为非整数，必须用测微目镜严格地测量，特别是 M 值，切不可粗略估读!

【实验内容】

1. 利用等色谱测光波波长及薄膜光学厚度

1) 设计获得等色谱的实验装置

主要参考仪器：分光计、三棱镜、透镜、白炽灯、测微目镜、光具座、云母薄片等.

设计装置时应考虑下列问题：

(1) 如何获得平行白光?

(2) 怎样保证平行光垂直入射到薄膜上? 思考如果实现垂直入射有困难，采用什么入射角对后面的测量有利，并观察等色谱暗带宽度随入射角变化的规律.

(3) 怎样才能获得清晰、波长范围较宽的等色谱，探讨其影响因素.

2) 利用等色谱测未知波长

将汞灯绿线(λ_1=546.1nm)和一条黄线(λ_2=577.0nm)作为比较谱，测定汞灯其他谱线的波长. 要求自行设计测量步骤，并写在实验报告上，特别是干涉级次差 M 的测量方法，要用图示说明.

将测量结果与理论值(汞灯谱线的波长值参看实验 5.13 中表 5.13.1)进行比较，分析测量结果的误差及误差原因.

提示：为了准确测量干涉级次 m_1、m_{xi} 及干涉级次差 M，需要将分光计的望远镜改装为显微成像系统. 此时可将望远镜目镜去掉，重新装上带套筒的测微目镜. 改装后需要对平行光管狭缝位置做少量调整.

3) 测量云母片的厚度

假定云母片折射率为 n=1.58，计算样品的厚度，并用其他方法(至少两种)测出该云母片的厚度，将测量值与计算值进行比较.

2. 利用等色谱定标单色仪

(1) 设计等色谱定标单色仪的实验装置.

(2) 利用等色谱定标单色仪. 要求：写出等色谱定标单色仪的方法原理及具体实验步

骤,作出定标曲线.

(3) 利用汞灯、氦灯各谱线作为已知波长对该单色仪定标,作出定标曲线,并与上面的结果进行比较,分析两种定标方法的优缺点.

(4) 分析等色谱定标单色仪的实验误差及产生误差的原因.

【习题】

(1) 利用等色谱测波长的原理是什么?

(2) 用测微目镜测量 M 时,如何保证有足够的测量精度,M 可取到小数点后第几位?

(3) 不同波长范围的等色谱(暗带)是否是等间距的? 两谱线间的级次差 Δm_i 该如何正确测量?

(4) 用等色谱定标单色仪时,怎样确定每条等色谱暗带所对应的波长值?

实验 5.16　钕玻璃吸收谱的测定

光通过物质后,其强度是有所减弱的. 被减弱的光的一部分被物质吸收,另一部分则被散射. 这些现象的产生是光与物质相互作用的结果. 吸收有一般吸收和选择吸收. 发射连续光谱的光,通过有选择吸收的物质,再通过分光仪,表现出某些波段的光或某些波长的光被吸收,因此在通过物质以后的光谱中出现黑色的谱带,就成为吸收光谱.

使用吸收光谱的测量方法,特别是在红外光谱区域,可以得到处在未激励的基态的原子和分子的有关信息;依据测得的吸收光谱图可以对被测物质进行定性和定量分析,确定其中所含某种杂质的含量,还可以确定其分子结构. 在石油化工、医药卫生和环境保护等领域,红外波段吸收光谱的测量有着广泛的应用.

本实验通过对钕玻璃吸收光谱曲线的测量,进一步熟悉单色仪、分光光度计等光谱仪器的性能和使用方法;了解吸收光谱的测量原理和学习吸收光谱的一种测量方法.

【实验原理】

通过吸收物质层的光通量 $\Phi(d,\lambda)$ 和入射到它上面的光通量 $\Phi_0'(\lambda)$ 的关系可以由布盖—朗伯—比尔组合定律(简称布盖吸收定律)描述

$$\Phi(d,\lambda) = \Phi_0'(\lambda)\exp\left[-k(\lambda)cd\right] \tag{5.16.1}$$

式中,$k(\lambda)$ 为吸收物质的吸收系数,c 为吸收物质的浓度(如果它溶于溶液中或与其他物质混合液中),d 为吸收层的厚度(假定这薄层是平面平行的,而光辐射垂直于薄层入射),$\Phi_0'(\lambda)$ 为入射到吸收物质层上面的、波长为 λ 的光通量,因为液态物质是装在带有透明窗的吸收池中的,所以必须考虑窗表面的反射损失. 而对固体试样,则需考虑试样表面的反射损失. 这种损失可以引入吸收池的透射系数 $\tau_0(\lambda)<1$ 来计算,则

$$\Phi_0'(\lambda) = \tau_0(\lambda)\Phi_0(\lambda) \tag{5.16.2}$$

式中,$\Phi_0(\lambda)$ 为入射到装有物质的吸收池上的光通量.

对于窗口材料相同的吸收池,可以得到

$$\tau_0(\lambda) = (1-R_1)^2(1-R_2)^2 \tag{5.16.3}$$

式中，R_1、R_2 分别为窗/吸收物质界面上的反射系数．在固体试样情况下，有

$$\tau_0(\lambda)=(1-R_1)^2 \tag{5.16.4}$$

式中，$R_1=(n-1)^2/(n+1)^2$，n 为固体试样的折射率．

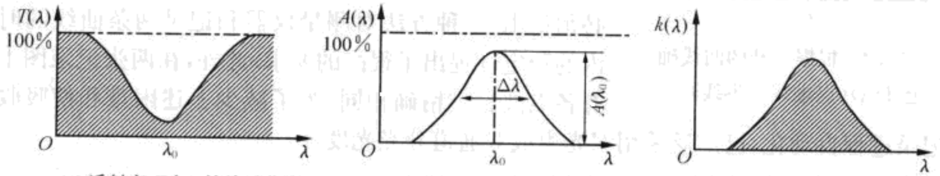
在布盖吸收定律(5.16.1)式中，通过物质的辐射通量与波长的关系 $\Phi(d,\lambda)$ 不仅决定于吸收系数 $k(\lambda)$，而且决定于 Φ_0' 与 λ（见(5.16.2)式）．这就是说，物质的吸收带呈现在光源辐射光谱和反射损失光谱的背景上．

为了消除被记录的吸收光谱 $\Phi(d,\lambda)$ 与光源光谱的关系，引入四个只表示吸收物质特性的量．

(1) 透射率 T，决定于关系式

$$T(\lambda)=\frac{\Phi(d,\lambda)}{\Phi_0'(\lambda)}=\exp[-k(\lambda)cd] \tag{5.16.5}$$

它在 $0<T<1$ 范围内变化，并且通常用百分数表示（$0\%<T<100\%$）．关系式 $T(\lambda)$ 常称为透射光谱（图 5.16.1(a)）．



(a) 透射率 T 与 λ 的关系曲线　(b) 吸收率 A 与 λ 的关系曲线　(c) 吸收系数 k 与 λ 的关系曲线

图 5.16.1　吸收光谱的表示方法

(2) 吸收率 A，决定于被吸收的能量与入射到吸收物质上的能量之比

$$A(\lambda)=\frac{\Phi_0'(\lambda)-\Phi(d,\lambda)}{\Phi_0'(\lambda)}=1-T(\lambda) \tag{5.16.6}$$

$A(\lambda)$ 值在 $0\%<A(\lambda)<100\%$ 范围内变化（图 5.16.1(b)）．

(3) 吸收物质的光密度 $D(\lambda)$，决定于关系式

$$D(\lambda)=\ln\frac{\Phi_0'(\lambda)}{\Phi(d,\lambda)}=\ln\left(\frac{1}{T(\lambda)}\right)=k(\lambda)cd \tag{5.16.7}$$

光密度 $D(\lambda)$ 与 $k(\lambda)$、c 与 d 呈线性关系．$D(\lambda)$ 值在 $0<D(\lambda)<\infty$ 范围内变化．

(4) 吸收系数 $k(\lambda)$ 决定于关系式

$$k(\lambda)=\frac{D(\lambda)}{cd}=\frac{1}{cd}\ln\left(\frac{1}{T(\lambda)}\right) \tag{5.16.8}$$

$k(\lambda)$ 值在 $0<k(\lambda)<\infty$ 范围内变化（图 5.16.1(c)）．$T(\lambda)$、$A(\lambda)$ 和 $D(\lambda)$ 与吸收原子或分子的浓度 c 以及吸收层的厚度 d 有关，$k(\lambda)$ 仅表示吸收物质的性质，即它的光谱特性．

吸收光谱的测量有光电方法和照相方法两种，后者应用较少．下面结合实验要求，仅讨论测量吸收光谱的光电方法．

在测量吸收光谱时，通常直接确定透射率 $T(\lambda)$，通过它也可以求得其他光谱特性，即 $A(\lambda)$、$D(\lambda)$ 和 $k(\lambda)$．

测量 $T(\lambda)$ 的方法有两种：

第一种方法是把单色仪波鼓置于不同的波长 λ 处，分别测量在单色仪狭缝前光束中

安置和不安置待测样品两种情况下由光电探测器转换的光电流信号(可用光点检流计的偏转格数显示,参阅单色仪实验).这种方法是波长间断变化时,逐点测量 $T(\lambda)$.此时测得的信号为 $i_T(\lambda)$ 和 $i_0(\lambda)$,则有

$$T(\lambda)=\frac{\Phi(d,\lambda)}{\Phi_0'(\lambda)}=\frac{\Phi(d,\lambda)}{\tau_0(\lambda)\Phi_0(\lambda)}=\frac{i_T(\lambda)}{\tau_0(\lambda)i_0(\lambda)} \tag{5.16.9}$$

对于折射率为 n 的钕玻璃样品,有

$$\tau_0(\lambda)=(1-R_1)^2=\left[1-\left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2\right]^2 \tag{5.16.10}$$

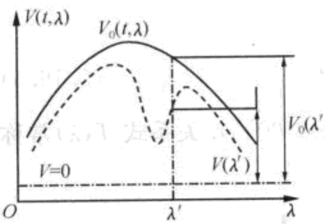


图 5.16.2　根据分开的曲线确定 $T(\lambda)$(点虚线—零线)

第二种测量透射率的方法在于以恒速扫描整个被研究的光谱区域连续记录信号 $V(\lambda')$ 和 $V_0(\lambda')$(带和不带待测样品),得到的曲线的纵坐标之比即为被测的量(图 5.16.2)

$$\frac{V(t,\lambda)}{V_0(t,\lambda)}=\tau_0(\lambda)T(\lambda)$$

必须指出,这种方法对测量仪器和记录两条曲线的时间内的稳定性提出了很高的要求.此外,在两张记录图上所有各点波长应精确相同.为了减少上述困难和使吸收光谱记录过程自动化,已广泛采用双光束或双通道分光光度计.

【实验器材】

单色仪实验所用仪器用具、钕玻璃片、72 型分光光度计、待测溶液样品等.

【实验内容】

1. 用反射式棱镜单色仪测量钕玻璃的吸收谱

(1) 绘出所用单色仪的定标曲线(N-λ 曲线).

(2) 自行设计实验方法测定钕玻璃片的折射率(可用 n_D 作为钕玻璃片折射率的近似值).用游标卡尺测出钕玻璃片的厚度 d.

(3) 测定钕玻璃的透射率 $T(\lambda)$.在可见光区域测定,以溴钨灯作光源,用硅光电池和光点检流计组成的光电接收器来测量相对光强信号 $i_0(\lambda)$ 和 $i_T(\lambda)$,用(5.16.10)式和(5.16.9)式计算 $T(\lambda)$.

注意:① 单色仪缝宽的选取要兼顾出射光的单色性和光通量两个方面.本实验要求调节缝 S_1 的宽度,使汞灯两条黄谱线能分开,调节出射缝 S_2 的宽度,可使其从显微镜中看出恰好与汞的一条黄谱线同样宽.

② 测量点的选取.实际测量前将钕玻璃片置于光路中,转动鼓轮观察钕玻璃片对不同波长的吸收情况,考虑选取哪些点测量,波长间隔(波鼓读数 N 的间隔)取多大等.在强吸收峰附近,测量点应更密集些.

③ 检流计量程的选取.为了避免测 $i_0(\lambda)$ 和 $i_T(\lambda)$ 时由于变换检流计量程(选择开关挡次)产生零点差异而引入的测量误差,最好在测量前不加样品,观察检流计偏转格数随

波长 λ 的变化情况,停在产生最大偏转的波长位置,调节光源电压,使其偏转格数较大(如 100 格)而又不超过量程. 在钕玻璃强吸收峰的波长 λ' 处,$i_T(\lambda')$ 很小,可适当增加光源亮度,此时 $i_0(\lambda')$ 可能超出量程,此时应对 $i_0(\lambda')$ 变换量程的零点误差进行修正.

(4) 由 $T(\lambda)$ 值计算 $A(\lambda)$,做出钕玻璃的吸收光谱曲线[$A(\lambda)$-λ 曲线].

2. 用分光光度计测定钕玻璃或某种待测溶液的吸收光谱(选做)

阅读仪器说明书,了解仪器结构及工作原理,熟悉仪器的操作方法,自行拟定测量步骤测定待测样品的吸收光谱曲线. 对于钕玻璃的吸收光谱应与 1 的测量结果进行比较.

本实验所用分光光度计属大型精密仪器,一定要倍加爱护,细心操作,不得将待测溶液倒入仪器中,更不容许自行拆卸仪器.

【习题】

(1) 为什么 $T(\lambda)$、$A(\lambda)$、$D(\lambda)$ 和 $k(\lambda)$ 均能表示吸收物质的特性?

(2) 用单色仪测 $T(\lambda)$ 时,为什么要求逐点同时测出某一波长 λ_1 的 $i_T(\lambda_1)$ 和 $i_0(\lambda_1)$,而不是先将 $i_T(\lambda)$ 测完后再测 $i_0(\lambda)$,为什么?

实验 5.17　薄膜厚度的测量

薄膜厚度是光学薄膜的一个重要性能参数,在薄膜的制备过程中或成膜后常需要精确测量它. 本实验采用干涉显微镜和读数显微镜,运用双光束等厚干涉和多光束等厚干涉原理来测量薄膜厚度. 通过本实验,要求掌握应用光的干涉原理进行高精度微小厚度测量的方法,并会用上述两种仪器测定薄膜的厚度.

5.17.1　用干涉显微镜测薄膜厚度

【实验原理】

干涉显微镜是干涉仪和显微镜的组合体. 它将被测件和标准光学镜面相比较,用光波作为尺子来衡量工件表面的不平度和深度,它能用于测量精密加工零件表面的光洁度. 由于光洁度表征了微观的不平和起伏,所以用显微系统进行高倍放大后再进行观察与测量.

干涉显微镜的基本光路如图 5.17.1 所示,它由四个部分组成:

(1) 显微照明系统. 白炽光源 1 经照明聚光镜 2 射向显微干涉系统. 为获得准单色光,其间可插入干涉滤光片 3.

(2) 干涉仪. 它的基本形式是一台迈克耳孙干涉仪,由分光板 P_1、补偿板 P_2、标准光学镜面 M_1 和被测件表面 M_2 组成.

(3) 显微镜系统. 由物镜 O_1、O_2 和目镜 E 组成.

(4) 照相系统. 由照相物镜 O_3 和感光板 4 组成.

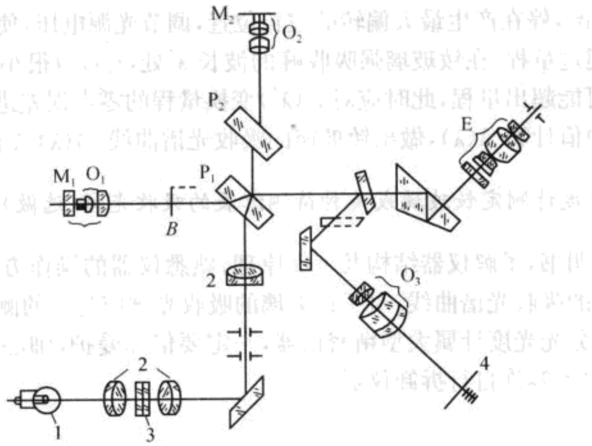


图 5.17.1　干涉显微镜光路图

干涉显微镜在微观区域产生等厚干涉图样，可以看成是标准镜面 M_1 和待测件表面 M_2 的像 M_2' 形成的.

同迈克耳孙干涉仪一样，当标准镜面 M_1 和待测件表面 M_2 的像 M_2' 形成一个小角度 α 时，在 M_1 的表面附近形成直线状等厚干涉条纹，如图 5.17.2 所示.

在 M_1 和 M_2' 相交处 S_0 形成零级干涉条纹，在 S_1、S_2……处，分别形成一级、二级……干涉条纹. 若楔角 α 不变，只增加或减少楔形薄层的厚度时，干涉条纹将不改变其间距而只发生条纹的移动. 当厚度增加 $\lambda/2$ 时，干涉条纹第 $k+1$ 级就移到 k 级条纹的位置上，即移动了一个条纹间隔 d_1. 反过来说，假如我们测得条纹移动了 d_2 的距离，即条纹移动 $d_2/d_1=\Delta N$ 个条纹间隔，则楔形薄层厚度的改变量 t 由下式决定

$$t=\frac{\lambda}{2}\Delta N=\frac{\lambda}{2}\cdot\frac{d_2}{d_1} \tag{5.17.1}$$

若被测件表面某部分镀有厚度为 t 的薄膜，则只要测量出干涉条纹的间距 d_1 和因镀了薄膜而引起干涉条纹的移动距离 d_2，就可求出该薄膜的厚度 t，如图 5.17.3 所示.

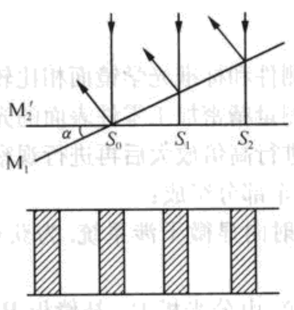


图 5.17.2

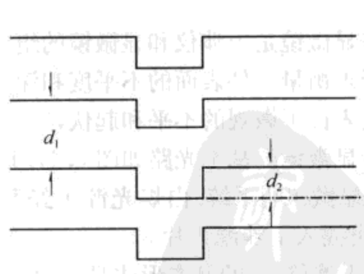


图 5.17.3

【仪器介绍】

干涉显微镜的结构如图 5.17.4 所示.

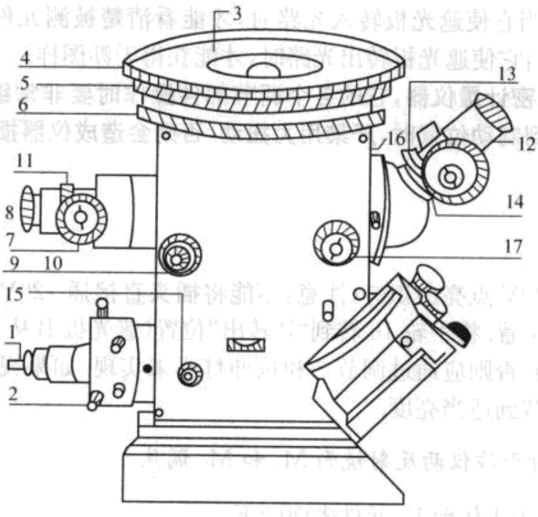


图 5.17.4　干涉显微镜的结构

1. 光源

白炽灯 1 通过低压电源变压器接市电 220V. 直接拉伸灯头和调节螺钉 2 使灯丝中心位于光轴上，此时视场明亮均匀.

2. 工作台

工作台 3 上放置被测元件，使被测面朝下. 推动滚花手轮 4，可使工作台做任意方向的平移，把欲测量部位移到显微镜视场中. 转动滚花手轮 5，可使工作台作 360°旋转. 转动滚花手轮 6，可使工作台沿高低方向移动，用以对被测元件表面 M_2 调焦.

3. 干涉图样调节机构

转动手轮 7，使物镜 O_1 对标准镜面 M_1 调焦. 转动手轮 8，可使物镜 O_1 和标准镜面 M_1 一起做轴向微量移动，以改变光程差而获得更好的干涉图样. 同时转动手轮 9、10 可改变干涉条纹的方向和宽度，以利于测量.

转动手轮 11 至两个极端位置之一时(注意：不要用力转过了头)，对不同元件表面来说，将获得有良好对比度的干涉条纹.

4. 观察目镜头

目镜分划板的分度格值为 1mm，鼓轮上刻线格值为 0.01mm. 松开螺钉 13，可将测微目镜 12 在目镜头 14 中转动，以便使分划板刻线与干涉条纹平行，此时才能正确测量.

5. 干涉滤光片和遮光板

通过手柄 15 可将滤光片推入或拉出光路，以获得单色光或白光照明. 仪器右上部有

遮光板转动手轮 16,当它使遮光板转入光路时,才能看清楚被测元件表面是否清晰地成像于目镜分划板上;当它使遮光板转出光路时,才能获得干涉图样.

干涉显微镜是**精密计量仪器,它的各个调节部件操作时要非常细心.调节各手轮、螺钉时只能缓慢旋转,到制动位置时,严禁用力扭动,否则会造成仪器损坏.**

【实验内容】

1. 光源调节

接通电源 6V/220V 点亮白炽灯(注意:不能将插头直接插 220V,以免烧坏灯泡).将手轮 17 转到"目镜"位置.将手轮 16 转到"B 转出"位置(遮光板 B 从光路中移出),此时应看到均匀明亮的视场,否则应通过调节 2 和拉伸灯头来实现.如果视场太亮或太暗,可转动变压器上旋钮,调节到适当亮度.

2. 显微镜系统对干涉仪两反射镜面 M_1 和 M_2 调焦

(1) 置被测元件于工作台上,元件表面朝下.

(2) 转动手轮 7,使目镜视场下方弓形直边清晰,此时 O_1 已对 M_1 表面调好焦.

(3) 转动手轮 16 到"B 转入"位置,再转动滚花手轮 6,直至目镜视场中看到清晰的被测元件表面的像为止,此时 O_2 已对 M_2 表面调好焦.然后,再将手轮 16 转到"B 转出"的位置上.

3. 调节干涉条纹的宽度和方向

(1) 将手柄 15 向左推到底,把干涉滤光片插入光路,此时在目镜中应能看到干涉条纹.如果没有条纹,就慢慢地来回转动手轮 8(微量改变两光路的程差)直到视场中出现清晰的干涉条纹.

(2) 转动手轮 9 和 10,改变干涉条纹的宽度和方向,直到有利于测量为止.

4. 测量

(1) 轻轻推动滚花手轮 4,将待测薄膜片移到适当位置,在视场中应看到没有镀膜与镀了厚度为 t 的膜的表面所产生的两组直线状干涉条纹,如图 5.17.3 所示.此时一组干涉条纹因厚度变化而相对于另一组干涉条纹移动了一个距离 d_2,每组条纹的间距为 d_1.

(2) 松开螺钉 13,转动测微目镜的方位(不能取下),使分划板十字丝的竖线与干涉条纹平行,准确地测得 d_1 和 d_2,由(5.17.1)式求出镀膜层的厚度 t(绿色干涉滤光片 $\lambda=530.0\text{nm}$).

重复上述步骤,对同一样品测量 6 次,求出 t 的平均值.

(3) 如果 $d_2>d_1$,应先用白光干涉条纹确定同级干涉条纹移动的大概位置后,再用单色光的干涉条纹来精确测定 t.

5.17.2 用读数显微镜测薄膜厚度

用读数显微镜测薄膜厚度可采用双光束等厚干涉和多光束等厚干涉两种方法.多光

束干涉可形成极为细锐的干涉条纹，透射光的干涉图样是在几乎全暗的背景上由一系列很细锐的亮条纹组成的；而反射光的干涉图样是在亮背景上由一系列细锐的暗条纹组成．由于可以精确地确定条纹的位置，故多光束干涉可以极大地提高测量精度．本实验利用多光束等厚干涉法来测量薄膜厚度．

【实验原理】

用一束单色平行光正入射到两块镀有反射膜的光学平面玻璃组成的空气楔上．若楔角和两反射膜的间距都很小，光束在气隙中经过多次反射与透射后，便可在其附近观察到多光束等厚干涉现象，其透射光的光强 I 分布为

$$I=\frac{I_0}{\left[1+\frac{4R}{(1-R)^2}\sin\frac{\delta}{2}\right]} \tag{5.17.2}$$

式中，I_0 为入射光强；R 为反射膜的反射率；δ 为相邻两光束的位相差，其值为

$$\delta=\frac{2\pi}{\lambda}2d\cos\gamma \tag{5.17.3}$$

式中，d 为空气层的厚度，γ 为光在空气层中的入射角．透射光强的分布曲线如图 5.17.5 所示，从图中可以看出，反射率越大，由透射光所形成的主极大越细锐．不镀反射膜（$R=0.05$）时，即过渡到双光束干涉的情形．显然多光束干涉条纹要比双光束干涉条纹细锐得多，因此测量时条纹的定位精确度很高．

本实验要求测量镀在平面玻璃基板上的一层介质薄膜的厚度（其厚度$<1\mu$m），如图 5.17.6(a)所示．将此基板和另一块平面玻璃均镀上一层铝膜（反射率为 80%左右），并将两者的膜相对叠合在一起，如图 5.17.6(b)所示．在一端稍加压力，即可在两铝膜之间形成一空气楔．在单色光的垂直照明下，迎着透射方向进行观察，可以看到如图 5.17.6(b)所示的两组错开的等厚干涉条纹．由于楔角不变，故两组条纹的间距不变，都等于 a，但基板中间未镀介质膜部分，由于气隙厚度突变，故这部分干涉条纹将向低干涉级次移动．若移动了 k（任意正整数）个级次，则气隙厚度增加 $k\lambda/2$，也即介质膜的厚度为 $k\lambda/2$．更为普遍的情形是中间干涉条纹除了移动整数级次 k 外，还移动了不足一个条纹宽度，即干涉级次还增加一个“小数”b/a，b 即为图 5.17.6(b)中所示的距离，且 $b<a$．于是，介质膜的厚度 t 为

$$t=\left(k+\frac{b}{a}\right)\cdot\frac{\lambda}{2} \tag{5.17.4}$$

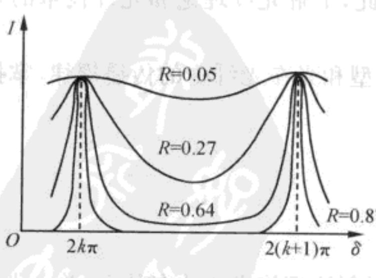


图 5.17.5

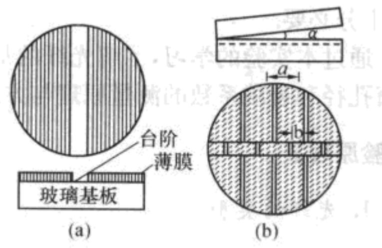


图 5.17.6

式中,a 和 b 可用读数显微镜测量,而 k 是一个待定的整数. 若采用两种不同的单色光来测量,就可定出整数 k. 例如,用汞灯的绿光($\lambda_1=546.1\text{nm}$)与钠光灯的黄光($\lambda_2=589.3\text{nm}$)分别进行测量,对 λ_1 来说,可以测出相应的 a_1、b_1,并设条纹移动量的整数部分为 k_1;对于 λ_2 来说,也可以测出相应的 a_2、b_2,设条纹移动量的整数部分为 k_2,代入(5.17.4)式后,得

$$\left.\begin{aligned} t &= k_1\frac{\lambda_1}{2}+\frac{b_1}{a_1}\cdot\frac{\lambda_1}{2} \\ t &= k_2\frac{\lambda_2}{2}+\frac{b_2}{a_2}\cdot\frac{\lambda_2}{2} \end{aligned}\right\} \tag{5.17.5}$$

在两个方程中有三个未知数,由于 k_1、k_2 是整数,而且薄膜厚度大约 $1\mu\text{m}$ 左右(约为绿光波长的 2 倍),故可令 k_1、k_2 分别为 0,1,2,3,4,…,逐一代入(5.17.5)式,计算出一系列 t 的可能值. 若在误差范围内,上述两波长各有一可能的 t 值彼此相近,则与其相应的 k_1、k_2、t 值即为正确值,这在光学测量上称为"符合法".

【实验内容】

自行安排实验装置,分别用钠光灯和汞灯[加干涉滤光片(透射中心波长 $\lambda=546.1\text{nm}$)]作光源,用读数显微镜对 a、b 重复测量 8 次,取平均值后用符合法求介质薄膜的厚度.

【习题】

(1) 实验 5.17.1 中,当干涉条纹移动量 d_2 大于条纹间距 d_1 时,为什么要用白光条纹来确定移动的级次? 实验 5.17.2 中能用白光条纹来确定级次吗,为什么?

(2) 条纹的相对位移量 b/a 与空气楔的楔角有关吗? 实验时空气楔角大些好还是小些好?

(3) 如何利用实验 5.17.2 的方法测量液体折射率?

实验 5.18 光纤数值孔径和衰减系数的测量

研究光导纤维传递光、信息和图像的学科称为纤维光学. 用光导纤维(简称光纤)来传递光能,具有光能损耗小、数值孔径大、分辨率高、可弯曲、结构简单、使用方便等特点. 自 20 世纪 70 年代初第一条适合通信用的石英光纤问世以来,光纤技术已取得惊人的发展,并成为现代科学技术领域中的重要组成部分. 因此,了解光纤理论和光纤技术的基本知识,十分必要.

通过本实验的学习,了解光纤的基本结构、类型和光在光纤中的传播规律,掌握光纤数值孔径和衰减系数的测量原理与方法.

【实验原理】

1. 光纤的类型

光纤是一种光波波段的导光材料,它利用全反射原理将光波约束其中,并沿光纤轴线

传输光能. 光纤是由折射率(n_1)稍高的纤芯和折射率(n_2)稍低的包层构成,实际的光纤为了吸收辐射波和保护光纤,在包层外还有涂敷层和塑料外套.

光纤的种类很多,按制作材料可分为低损耗的高纯度熔石英光纤以及成本低而损耗较大的普通玻璃光纤和塑料光纤等;按传输模式的数量可分为传输单一模式的单模光纤和同时传输多种模式的多模光纤;按传输的偏振态,单模光纤又可分为保偏光纤或非保偏光纤;以及按特定波长、特种材料分类的特种光纤等. 下面以纤芯折射率分布区分的两种光纤为例介绍光纤的基本结构.

1) 阶跃折射率光纤

阶跃型光纤的纤芯折射 n_1 的分布是均匀的,包层折射率 n_2 略低于 n_1,在纤芯与包层的界面处折射率发生突变. 由于纤芯/包层界面的全反射,光线在纤芯内的径迹是锯齿型的折线. 对入射面包含光纤轴线的光线或者说与光纤轴线相交的光线——子午光线,其径迹是平行射线;对入射面不包含光纤轴线的光线——偏射光线,其径迹是旋进式空间折线,即旋转前进始终不与轴线相交. 图 5.18.1 给出了偏射光线(a)和子午光线(b)在光纤截面上的投影. 单根阶跃型光纤可以传输光但不能传输图像,若要传输图像需用多根光纤组成的光缆. 图 5.18.2 分别给出了阶跃型多模及单模光纤的折射率分布和光线传播特性.

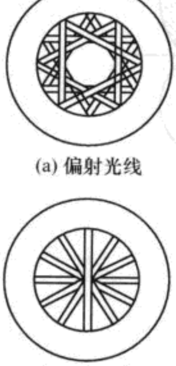


图 5.18.1 偏射光线及子午光线

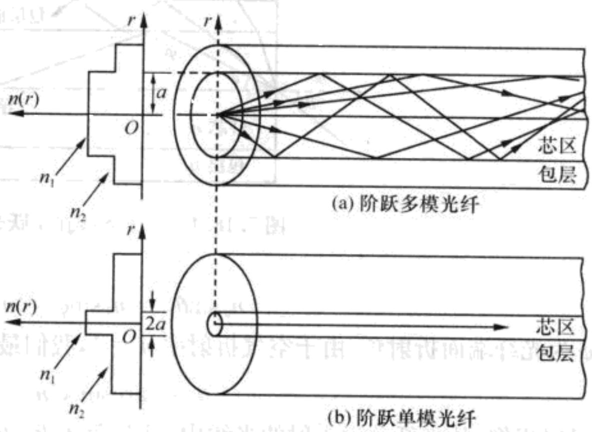


图 5.18.2 阶跃型单模及多模光纤

2) 梯度折射率光纤

梯度型光纤的纤芯折射率不再是常数,而是按某种函数关系连续变化,如应用最为广泛的聚焦光纤,其折射率的变化呈抛物线型,由光纤轴线处最大值 n_1 沿径向逐渐减少至界面处的包层折射率 n_2,如图 5.18.3(a)所示. 聚焦光纤中的径迹不同于阶跃光纤,不同入射角的子午光线是具有相同空间周期的简谐曲线,经历一次全反射后能重新会聚到一点,图 5.18.3(b)给出了聚焦光纤的光线传播特性. 偏射光线形成旋进式螺旋线,尽管大部分路径在低折射率区,路径较长,仍会得到自聚焦的结果. 聚焦光纤的主要优点是单根光纤可以传输图像.

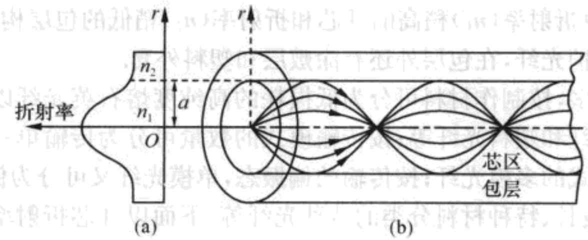


图 5.18.3　抛物线型聚焦光纤

2. 光纤的数值孔径

如图 5.18.4 所示，为从空气 n_0 入射到阶跃型光纤端面的子午光线在光纤中的传播状况，入射的光纤能否在纤芯中传播取决于入射角 θ，设入射角为 θ_0 的一条光线恰好在纤芯与包层界面发生全反射，则

$$\sin\varphi_c = \frac{n_2}{n_1}$$

式中，φ_c 为界面临界入射角，n_1 和 n_2 分别是纤芯和包层的折射率. 根据折射定律，有

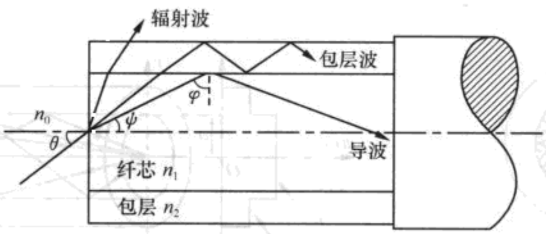


图 5.18.4　子午光线在阶跃光纤中传播

$$n_0\sin\theta_0 = n_1\sin\psi = n_1\cos\varphi_c$$

ψ 为光纤端面折射角. 由于空气折射率 $n_0=1$，我们最终得到

$$\theta_0 = \arcsin\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \tag{5.18.1}$$

可以想像，从光纤端面入射的光线中，凡是落入 $\theta \leqslant \theta_0$ 这一锥体内的入射光线，均可以在纤芯中传播成为导波，而锥体外的入射光线将进入包层，成为包层波或辐射波而无法传播. 由此可见 θ_0 反映了光纤的受光能力，被称为光纤的孔径角，它的数值由光纤的数值孔径决定. 数值孔径定义为

$$\text{N. A} = n_0\sin\theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \tag{5.18.2}$$

式中，N. A 是英文 numerical aperture 的缩写，是表征多模光纤集光能力大小的一个重要参量，它越大就表示光纤接收的光能量越多. 由上式可知，N. A 仅由光纤的纤芯和包层折射率决定，而与其几何尺寸无关. 这样，在制作光纤时可将它的数值孔径做得很大（N. A 可以从 0.2 到接近于 1），而它的截面积却很小，使光纤变得柔软而可弯曲. 这是光纤能够开辟一个新的应用领域的原因之一.

值得注意的是基于射线光学或光线光学的数值孔径的概念，只适应于芯径较大(50～100μm)的多模光纤.而在芯径通常小于10μm的单模光纤中，射线光学将被波动光学所取代，不再使用数值孔径的概念，模场直径将成为描述单模光纤的重要参量.

3. 光纤的衰减系数

沿光纤传输的光，其强度会逐渐减弱.设入射到光纤端面的光强为I_0，则从光纤另一端输出的光强I可用下式表示

$$I = i_0 e^{-\alpha l} \tag{5.18.3}$$

式中，l为光纤的长度，α为光纤的衰减系数.

实际上光束经过光纤的光强减弱有三个因素：光束在输入端面的反射和散射(设它的系数为A)；光束在输出端面的反射和散射(设它的系数为B)和光纤芯料的吸收和散射(其衰减系数为α).因此，入射光强为I_0的光束通过长度为l_1的光纤后，其出射光强为

$$I_1 = I_0(1-A)e^{-\alpha l_1}(1-B) \tag{5.18.4}$$

如果要测得α值，只须在测得I_1后，再将光纤截去长度为l的一段，测出剩下一段长度为l_2的光纤的出射光强

$$I_2 = I_0(1-A)e^{-\alpha l_2}(1-B) \tag{5.18.5}$$

将上两式相除得

$$\frac{I_1}{I_2} = e^{-\alpha(l_1-l_2)} = e^{-\alpha l} \tag{5.18.6}$$

式中，$l=l_1-l_2$是截去的长度.

两边取自然对数，即得光纤的衰减系数为

$$\alpha = \frac{\ln I_2 - \ln I_1}{l} \tag{5.18.7}$$

实际应用中，常用下式表示光纤的衰减系数

$$\alpha_P = \frac{10\lg(P_0/P_1)}{L}\ (\mathrm{dB\cdot km^{-1}}) \tag{5.18.8}$$

式中，L为光纤的长度(单位km)，P_0为输入端光功率，P_1为输出端光功率，α_P为每公里光纤的衰减系数.目前比较好的光纤α_P为0.2～0.5dB/km.

【实验内容】

1. 多模光纤数值孔径的测定

1) 利用全反射的边界光线确定光纤的有效数值孔径的测量原理

在拉制光纤的过程中，纤芯玻璃和包层玻璃互相渗透，在接触面形成一个过渡层，过渡层的折射率既不等于纤芯的折射率n_1，也不等于包层的折射率n_2，而和n_1、n_2有复杂的函数关系，从而使得数值孔径下降.此外数值孔径还受界面的不规则程度、不均匀、缺陷等因素的影响，所以光纤的数值孔径比理论值要小，实验测量是很必要的.

如图5.18.5所示，光线在纤芯与包层界面上的入射角φ小于临界角φ_c时，总有部分

光能折射出界面，见图中 $CC'C''$；当入射角 φ 恰好等于临界角 φ_c 时，折射角为 90°，折射光线沿纤芯和包层界面传播，见图中 $AA'A''$，此时在光纤端面上的入射角即为孔径角 θ_0. 当光线在端面的入射角小于 θ_0 时，如入射光 B，因在纤芯包层界面上的入射角大于临界角 φ_c，所以它在光纤内多次全反射，沿着 $BB'B''$ 从另一端出射. 我们可以利用这一原理来测量光纤的数值孔径.

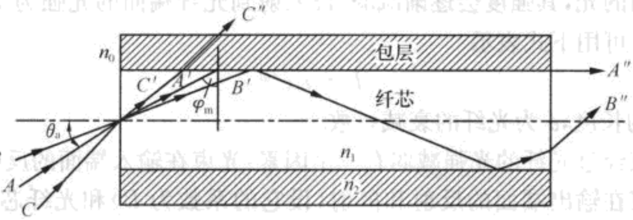


图 5.18.5　光纤传光原理图

2) 测量装置及光路

本实验使用的仪器为：溴钨灯、单色仪、显微镜、多模光纤及光纤微调架、带刻度的水平转盘、透镜等，实验装置如图 5.18.6 所示.

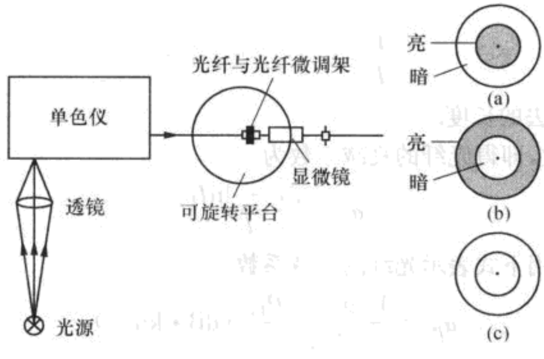


图 5.18.6　测光纤数值孔径装置图

光源通过单色仪输出单色光照亮光纤端面，光纤夹在光纤微调节器架上，置于有刻度可旋转的圆盘上，由 200 倍的显微镜来观察光纤出射端面的亮度，显微镜也固定在圆盘上.

3) 测量

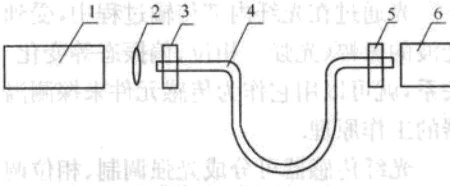
点亮灯泡，调节入射光路，使圆形光斑正对单色仪入射窗口，将单色仪调到所需波长. 再调光纤微调架，使光垂直射入光纤端面，调节显微镜使其聚焦在光纤出射端面上，旋转圆盘，即改变入射到光纤端面的入射角，在显微镜中注意观察光纤出射端面的亮度变化.

如图 5.18.6(a)所示，纤芯比包层亮，这相当于 $\varphi>\varphi_c$，全反射发生，光在纤芯传播. 当包层亮度大于纤芯亮度时，见图 5.18.6(b)，相当于 $\varphi<\varphi_c$，全反射条件被破坏，光线在包层中折射，因而包层反而是亮的. 最关键的是图 5.18.6(c)，此时纤芯与包层有同一亮度，只是它们为亮的光带所隔开，这是由于折射光在纤芯和包层界面上传播所致.

旋转圆盘，当光纤端面如图 5.18.6(c)所示时，记下圆盘上的游标读数，再反向旋转，当再次看到图 5.23.6(c)所示端面时，记下圆盘的游标读数. 圆盘转过的角度即为 $2\theta_0$. 重复测量 $2\theta_0$ 三次，求出 θ_0 的平均值，代入(5.18.2)式，算出多模光纤的数值孔径($n_0\approx1$).

2. 光学纤维衰减系数的测定

实验装置如图 5.18.7 所示. 用一显微物镜(×10)将 He-Ne 激光束会聚，光学纤维一端固定在五维调节支架上，利用调节支架移动光纤端面的位置并改变其倾斜程度，使在光纤输出端后的功率计测得最大值，即 I_1 值. 此后不再移动调节支架(也就是使光束入射到输入端面的情况保持不变)，将光纤截去大半段，留下输入端面附近的一小段，再用功率计测量该段的出射光强 I_2. 量出截下段的纤维长度 l，代入(5.18.7)式求出该光纤的衰减系数 α.



1.He-Ne激光器；2.显微物镜(×10)；3.五维调节支架；4.光学纤维；5.二维调节支架；6.激光功率计

图 5.18.7

实验时必须注意下列几点：

(1) 截去一段后光学纤维的输出端面必须具有与原来的输出端面相近的物理状态，以确保两次测试中端面反射受到的影响相同.

(2) 测量 I_1 和 I_2 时，必须将输出端和功率计靠近，且其相对位置保持不变，以免引起较大的测量误差.

(3) 由于激光器的输出功率实际上略有变化，因此应使测得 I_1 和 I_2 的时间间隔尽可能缩短，以使入射光强 I_0 在这段时间内几乎不变.

【习题】

(1) 光纤的导光原理是什么？

(2) 何谓光纤的数值孔径？怎样测量其数值孔径？

(3) 测量光纤衰减系数时，两根长度不同的光纤为何必须在同一根光纤上截取？测量时应注意哪些问题？

(4) 光纤的衰减系数是否与光波波长有关？

实验 5.19　光纤温度传感特性的研究

光纤是 20 世纪 70 年代为光通信而发展起来的一种新型材料. 它是用玻璃预制棒拉丝而成的纤维，与其他材料相比具有许多独特的性能，如：质地柔软，有良好的传光性能；频带宽，能同时传输大量信息；电绝缘性能好；不受电磁干扰等. 此外，光纤本身就是一个敏感元件，即光在光纤中传输时，光的特性如振幅、相位、偏振态等将随检测对象的变化而相应变化. 光从光纤出射时，光的特性得到调制，通过对调制光的检测，便能感知外界的信息，从而构成各种光纤传感器，这是光纤在光纤通信领域以外的应用.

本实验要求根据双光束干涉原理，自行设计构造一个光纤干涉仪，观察干涉现象，并考察干涉条纹形状及影响可见度的因素；了解相位调制测温的基本原理，采用自组光纤干涉仪研究温度变化与干涉条纹移动数目的关系.

【实验原理】

光通过在光纤内部传输过程中，受到外界因素(如温度、压力、磁场等)的作用，会引起光波的振幅(光强)、相位、偏振态等变化. 因此，我们只要测出这些参量随外界因素的变化关系，就可以用它作为传感元件来探测温度、压力、磁场等物理量的变化，这就是光纤传感器的工作原理.

光纤传感器可分成光强调制、相位调制、偏振态调制和波长调制四种形式，本实验涉及的是相位调制型光纤温度传感器. 外界温度对光纤作用能引起光纤中传播光波的相位发生变化，目前使用的光探测器只能探测光强，因此需采用光纤干涉仪来检测相位变化，才能实现对外界温度的检测.

通常用于干涉测量的干涉仪主要有四种，它们是迈克耳孙干涉仪、马赫-曾特尔干涉仪、塞格纳克干涉仪和法布里-珀罗干涉仪. 这些干涉仪具有一个共同点，即它们的相干光均在空气中传播. 由于空气受环境温度的影响，引起空气折射率扰动及声波干扰，这些影响都可能导致空气光程的变化. 这些变化反映到干涉测量中，将使工作不稳定及精度降低. 利用单模光纤作干涉仪的光路，就可排除这些影响，并且可以取消对光路长度相当严格的限制，从而制造出有千米量级光路长度的光纤干涉仪. 上述四种干涉仪均可构成全光纤干涉仪，其中马赫-曾特尔干涉仪和法布里-珀罗干涉仪已用于相位调制型光纤温度传感器中.

如图 5.19.1 所示为马赫—曾特尔干涉仪测温的原理图. 氦氖激光通过扩束器扩束后，由分束器分成两束，分别经短焦距透镜(或显微物镜)耦合进入两根光纤，将两光纤输出端密接在一起，两输出光波在空间叠加，形成明暗相间的干涉条纹. 令一根光纤为参考臂，置于恒温器中，一般认为，它在测温过程中光程始终保持不变；另一光纤为信号臂，置于待测温度场中，在温度作用下，信号臂光纤的长度 L 和折射率 n 均发生变化. 于是输出两光波的光程差(相位差)也发生相应变化，因而使干涉条纹移动. 观测条纹移动的数目，便可确定温度的变化.

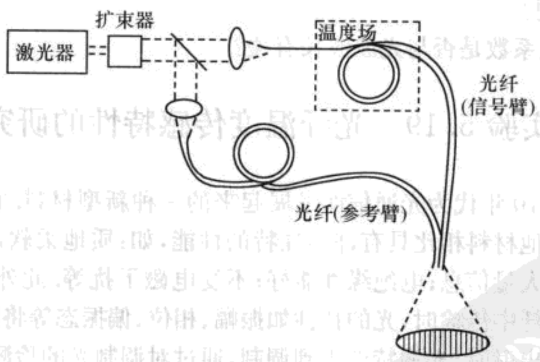


图 5.19.1

令通过信号臂光纤的光波相位为

$$\varphi=\frac{2\pi}{\lambda}nL \tag{5.19.1}$$

由温度变化引起的相位变化则可写成

$$\Delta\varphi=\frac{2\pi}{\lambda}(L\Delta n+n\Delta L) \tag{5.19.2}$$

改写上式可得

$$\frac{\Delta\varphi}{L\Delta T}=\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{\Delta n}{\Delta T}+\frac{n\Delta L}{L\Delta T}\right) \tag{5.19.3}$$

式中，没有计入光纤直径变化对相位变化的影响. 因为直径变化引起光相位变化与长度变化引起的相位变化相比很小，可以忽略不计.

采用 He-Ne 激光时，$\lambda=632.8\text{nm}$，对于石英玻璃光纤，$n=1.456$，$\Delta n/\Delta T=10\times10^{-6}\cdot℃^{-1}$，其线膨胀系数 $\Delta L/L\Delta T=5\times10^{-7}\cdot℃^{-1}$，将这些数值代入(5.19.3)式可得

$$\frac{\Delta\varphi}{L\Delta T}=107\text{rad}\cdot℃^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$$

换算成干涉条纹，则意味着在一米长的光纤上，温度变化1℃有17个干涉条纹移动. 通过条纹计数就能得出温度变化值.

【实验内容】

1. 建立光纤干涉仪实验装置并观察干涉现象

(1) 取两根适当长度的单模光纤，注意使两光路光程大致相等，切削好光纤的端面.

(2) 按自行设计的光路调整好各种元器件，使激光尽可能多地耦合到两光纤中，注意使耦合到两光纤的光强大致相同，并使两光纤出射端紧靠在一起.

(3) 用测微目镜或读数显微镜观察光纤出射的激光光斑，前后移动测微目镜，直至条纹间距有一定宽度，能清晰分辨为止.

(4) 观察干涉现象，记录并解释观察结果.

① 两光纤出射端并行放置与前后错位放置，干涉条纹形状有何变化？怎样放置才能得到干涉圆条纹？

② 两光纤出射端并行放置且有一定角度时，改变其角度，观察干涉条纹宽度的变化规律.

③ 改变耦合进入两光纤的光强比，观察条纹可见度的变化.

2. 用自组光纤干涉仪研究温度变化与条纹移动数目的关系

将信号臂光纤置于温度场中，利用调压变压器电源控制温度场的温度变化速率，以干涉条纹移动的速度便于计数为准. 温度场中插入温度传感器或温度计测量温度.

温度变化范围取室温至100℃，以 ΔT 为2℃做一测量点，记录温度变化 ΔT 时条纹移动数目 N，做出温度变化与条纹移动数的关系曲线. 测量温度场中光纤的长度 L，算出 $\Delta\varphi/L\Delta T$ 的值并与理论值进行比较，分析结果的误差来源.

【习题】

(1) 若只用 He-Ne 激光器、一个显微物镜和两根等长度的单模光纤构成一干涉装置，试问该装置类似何种干涉装置？能不能直接用白屏接收到条纹？

(2) 光纤干涉仪测温的原理是什么？怎样才能保证测温过程中干涉条纹始终朝一个方向移动？

实验 5.20　光纤位移/压力传感特性的研究

【实验目的】

(1) 了解光纤传感实验仪的基本结构、原理和使用方法；

(2) 熟悉 LED 光源的 I-P 特性，掌握其测量方法；

(3) 定性了解光纤纤端光场(纵向、轴向)分布，掌握其测量方法和计算方法；

(4) 了解反射式位移传感器的原理，掌握其调制特性曲线的测量方法；

(5) 了解光纤弯曲损耗的机理及特性，学习利用微弯损耗测量位移/压力的方法.

【实验原理】

本实验所用的光纤传感实验仪采用了强度型光纤传感的方式，这里分别讨论透射调制、反射调制和微弯调制的基本传感原理，并在光纤端出射光场分布函数的基础上，建立相应的理论分析方法.

对于多模光纤来说，光纤端出射光场的场强分布由下式决定

$$\Phi(r,z)=\frac{I_0}{\pi\sigma^2 a_0^2[1+\zeta(Z/a_0)^{3/2}\tan\theta_c]^2}\cdot\exp\left[\frac{-r^2}{\sigma^2 a_0^2[1+\zeta(Z/a_0)^{3/2}\tan\theta_c]^2}\right]\tag{5.20.1}$$

式中，I_0 为由光源耦合进入发送光纤中的光强，$\Phi(r,z)$ 为纤端光场中位置(r,Z)处的光通量密度，σ 为一表征光纤折射率分布的相关参数，对于阶跃光纤，$\sigma=1$，a_0 为光纤芯半径，ζ 为与光源种类、光源跟光纤耦合情况有关的调制参数，θ_c 为光纤的最大出射角.

如果将同种光纤置于发送光纤纤端出射光场中作为探测接收器时，所接收到的光强可表示为

$$I(r,z)=\iint_s\Phi(r,z)\mathrm{d}s=\iint_s\frac{I_0}{\pi\omega^2(z)}\cdot\exp\left[\frac{r^2}{\omega^2(z)}\right]\mathrm{d}s\tag{5.20.2}$$

式中

$$\omega(z)=\sigma a_0[1+\zeta(z/a)^{3/2}\tan\theta_c]\tag{5.20.3}$$

式中，S 为接收光面，即纤芯面.

在光纤端出射光场的远场区，为简便计，可将接收光纤端面中心点处的光强作为整个纤芯面上的平均光强，在这种近似下，得到在接收光纤终端所探测到的光强公式为

$$I(r,z)=\frac{SI_0}{\pi\omega^2(z)}\cdot\exp\left[-\frac{r^2}{\omega^2(z)}\right] \tag{5.20.4}$$

1. 透射调制方式

最简单的透射式强度调制光纤传感原理如图 5.20.1(a)所示. 调制处的光纤端面为平面，通常入射光纤不动，而接收光纤可以作纵(横)向位移. 这样，接收光纤的输出光强被其位移调制.

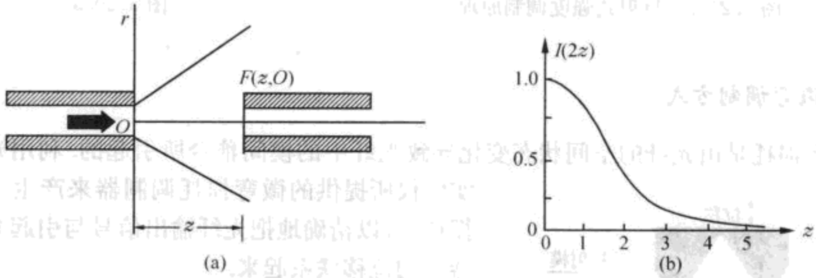


图 5.20.1　透射式强度调制光纤传感原理

透射型调制方式的分析较简单. 在发送光纤端，其光场分布为一立体光锥，各点的光通量由函数 $\Phi(r,z)$ 来描写，其光场分布坐标如图 5.20.1 所示. 当接收光纤置于发送光纤纤端光场中时，所接收到的光强可近似地由(5.20.4)式给出.

当 z 固定时，得到的是横向位移传感特性函数. 而当 r 取定值时(如 $r=0$)，则可得到纵向位移传感特性函数，如图 5.20.1(b)所示.

2. 反射调制方式

由于反射调制式光纤传感器具有准确、简单、价格低廉等优点，对于传感器的广泛应用特具魅力. 这种传感器通常由两根光纤组成，一根光纤把光传送到反射体，另一根光纤接收反射光并把光传到探测器. 检测到的光强取决于反射体和探头之间的距离，如图 5.20.2 所示.

双纤式是最基本的反射调制方法，其坐标分析系统如图 5.20.2 所示. 在分析过程中，采用等效分析法. 首先，画出接收光纤关于反射体的镜像. 然后利用透射分析法，直接计算出该镜像接收光纤在发送光纤纤端光场中所接收到的光强值. 最后，将该光强值乘以反射体的反射率 R，作为实际系统的等效结果.

图 5.20.2 所示的反射调制系统中，其接收光纤等效坐标位置为 $F(2z,d)$，其中，d 为发送光纤轴心到反射接收光纤轴心间的距离，将其代入(5.20.4)式，并乘以反射率 R 有

$$I(z)=\frac{RI_0}{\sigma^2[1+\zeta(z/a_0)^{3/2}\tan\theta_c]^2}\cdot\exp\left[-\frac{d^2}{\sigma^2a_0^2[1+\zeta(z/a_0)^{3/2}\tan\theta_c]^2}\right] \tag{5.20.5}$$

该函数的曲线形状如图 5.20.3 所示.

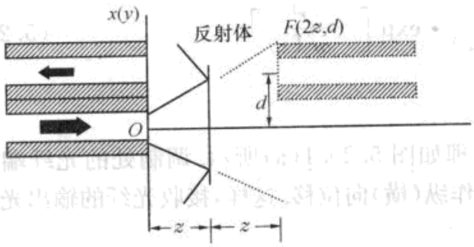


图 5.20.2　反射式强度调制原理

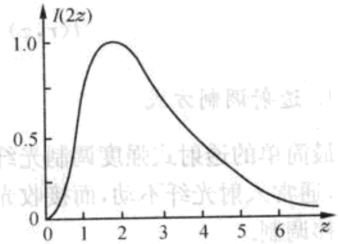


图 5.20.3

3. 微弯调制方式

微弯损耗是由光纤的空间状态变化导致光纤中的模间藕合所引起的. 利用光纤传感实验仪所提供的微弯损耗调制器来产生一种受控损耗,可以精确地把光纤输出信号与引起光纤微弯器件的位移联系起来.

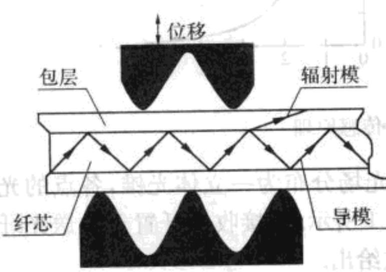


图 5.20.4　微弯损耗调制器的原理

微弯损耗调制器的原理如图 5.20.4 所示. 一根多模光纤夹在一个空间周期呈梳状结构的变形器中间,选取空间周期以使它与光纤中适当选择的两个模之间的传播常数差相匹配. 因而,光纤中的光功率分布随空间感应耦合而变,特别是原来在纤芯中传播的某些光将转移到包层中.

如果预定引起耦合的两个模的传播常数分别为 β 和 β',那么所需求的值 Λ 是

$$\Delta\beta = |\ \beta - \beta'\ | = 2\pi/\Lambda \tag{5.20.6}$$

式中,Λ 为波纹周期. 这是因为只有满足这种关系,相位失配才为零,模间藕合达到最佳. 因此,波纹的最佳周期决定于光纤的模式特性. 变形器的位移改变了弯曲处的模振幅,从而产生强度调制. 调制系数可写成

$$Q = \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x} \cdot \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}p} \tag{5.20.7}$$

式中,T 为光纤的传播系数,x 为变形器的位移,P 为压力.

【仪器介绍】

光纤传感实验仪是由光纤传感实验仪主机、LED 光源、发射光纤、PIN 光电探测器、接收光纤、三维微位移调节器、反射器、微弯变形器等组成的实验系统,如图 5.20.5 所示.

它包括四部分:

(1) 光纤传感实验仪主机. 其功能是:为 LED 光源提供驱动电流;完成光电转换及放大作用,并输出电信号.

(2) 三组光纤及探头:反射式发射光纤及探测接收光纤;透射式探测接收光纤;微弯

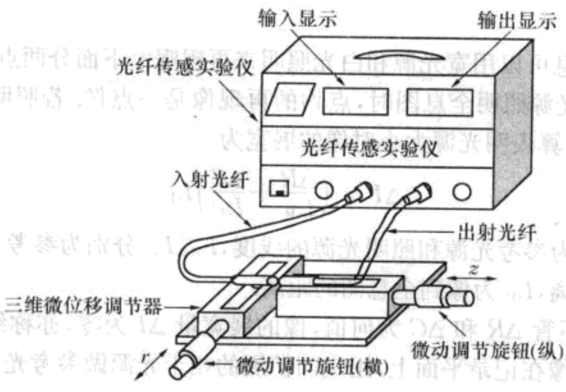


图 5.20.5

式发射-接收光纤.

(3) 三维微位移调节器. 用以固定光纤探头,实现微位移定量调节(精度为0.01mm).

(4) 反射器和微弯变形器,配在三维微位移调节器上.

【实验内容】

(1) 测定LED光源的 I-P 特性曲线(调节电流,每隔2.5mA记录一次电压输出值).

(2) 测定光纤纤端光场径向分布. 要求两光纤探头的间距设定为0.5mm和1.0mm,分别测定光纤纤端光场径向分布,在同一坐标纸上作出两条实验曲线.

(3) 测定光纤纤端光场轴向分布(在坐标纸上作理论曲线和实验曲线).

(4) 测量反射式位移传感器的调制特性曲线.

(5) 微位移测量及微弯特性研究.

实验 5.21 像面全息与彩虹全息

【实验目的】

(1) 了解像面全息白光再现原理及彩虹全息原理.

(2) 掌握制作像面全息与一步彩虹全息图的实验方法.

【实验原理】

1. 像面全息

物体紧贴全息记录介质,或利用成像系统使物体成像在记录介质附近,再引入一束与之相干的参考光,即可用干涉条纹的形式记录全息图. 当物体的像位于记录介质面上时称为像面全息,它的特点是可以用宽光源和普通白光源来再现,能够观察到清晰

的像.

为什么像面全息可以用宽光源和白光照明来再现呢？下面分两点予以说明：

(1) 通常用点光源照明全息图时，点物的再现像是一点像. 若照明光源的线度增加，像的线度也增加. 计算表明光源大小对像的展宽为

$$\Delta I=\left(\frac{\Delta R}{L_{\mathrm{R}}}+\frac{\Delta C}{L_{\mathrm{C}}}\right)L_{\mathrm{P}} \tag{5.21.1}$$

式中，ΔR、ΔC 分别为参考光源和照明光源的线度，L_R、L_C 分别为参考光源、照明光源到全息图坐标原点的距离，L_{P} 为像到全息图的距离.

当 $L_{\mathrm{P}}=0$ 时，不管 ΔR 和 ΔC 为何值，像的展宽量 ΔI 为零，亦称线模糊量为零，即对于平面物体使其成像在记录平面上，用空间扩展的相干光源做参考光记录，再现时用扩展光源照明，也能够再现出清晰的像.

(2) 全息图相当于一个复杂的光栅，它在白光照射下会产生色散，使各个波长的像相互交叠，从而导致像模糊，这是普通全息图不能用白光再现的原因. 再现像由于照明光源的线宽$\Delta\lambda$而展宽的现象称为色模糊. 色模糊量与全息图的色散率 $\mathrm{d}\theta_1/\mathrm{d}\lambda$、光源的线宽 $\Delta\lambda$ 及像到全息图的距离 L_{P} 有关，可用下述公式表示

$$\Delta I_{\lambda}=L_{\mathrm{P}}\cdot\Delta\lambda\cdot\frac{\mathrm{d}\theta_1}{\mathrm{d}\lambda} \tag{5.21.2}$$

因此，当 $L_{\mathrm{P}}\to 0$ 时，色模糊量也趋近于零. 这就是说记录全息图时，只要将物体本身或物的像置于记录介质上，则再现像的位置就在全息图平面上，它不随照明光源的波长而变. 也就是说可用白光源再现清晰的像.

像面全息的记录方式有两种：一种是透镜成像，图 5.21.1 为它的记录光路，其中 O′ 是物体 O 通过透镜 L_1 成的像；另一种采用两步记录，第一步用漫反射全息记录光路制作一张物体 O 的全息图 H_1，第二步用与原参考光波共轭的光波照明全息图 H_1，得到物 O 的共轭实像 O^*，O^* 的光波为物光，另引入 R_2 为参考光摄得像全息图 H_2，如图 5.21.2 所示.

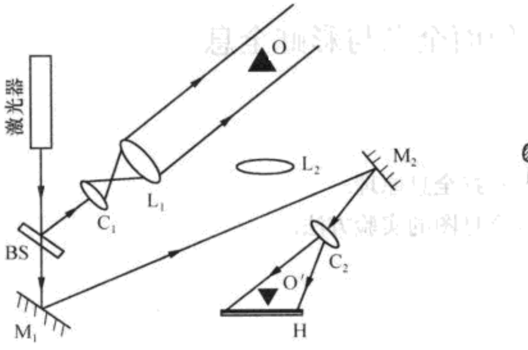


图 5.21.1　透镜成像记录像面全息光路

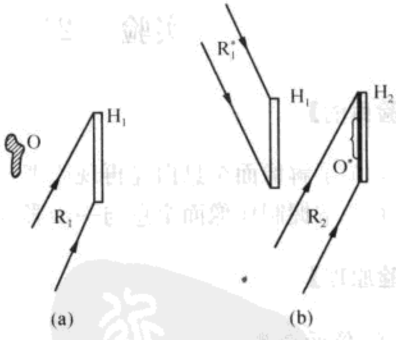


图 5.21.2　两步法记录原理图

2. 彩虹全息

彩虹全息是用激光记录、白光照明再现单色像的一种全息技术. 它实质上是一种像全

息,所不同的是,记录彩虹全息时在记录光路中适当位置加入一个狭缝,以限制再现像.

1) 两步彩虹全息

两步彩虹全息为本顿(Benton)于 1969 年首先提出的. 所谓两步指的是两步记录:第一步,记录一张物体 O_1 的普通全息图 H_1,称为主全息图,如图 5.21.3(a)所示;第二步用与参考光 R_1 共轭的光束 R_1^* 照明 H_1,产生物体的赝实像 O_2(凸凹与原物相反的像,叫赝像). 在 H_1 的后面放置一狭缝 S,在实像 O_2 的前面放置全息干板,用会聚的参考光 R_2 记录第二张全息图 H_2,见图 5.21.3(b).

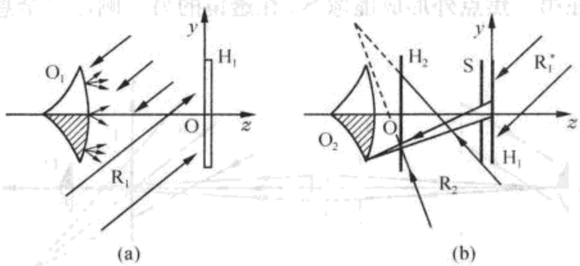


图 5.21.3　两步彩虹全息记录原理图

若再现时用与 R_2 共轭的发散激光 R_2^* 照明全息图 H_2,则在全息图的另一侧出现狭缝 S 的再现实像,将眼睛置于狭缝像的位置就可以看到物体的再现虚像. 如果眼睛的位置在狭缝实像的前面或后面,便不能观察到完整的物像. 当用白光照明时,对于不同波长的光,狭缝的像和物体的再现像位置都不同. 由于狭缝像的位置不同,在不同狭缝像的位置将看到不同颜色的像. 如图 5.21.4 所示,S_R、S_G 和 S_B 分别表示红、绿和蓝光的狭缝像的位置,如果将眼睛分别置于这些位置,就会看到红、绿和蓝的单色像. 当眼睛位置能使几种颜色的光同时进入眼瞳时,就会看到物体有连续变化的颜色,像雨后天空中的彩虹一样,故称彩虹全息.

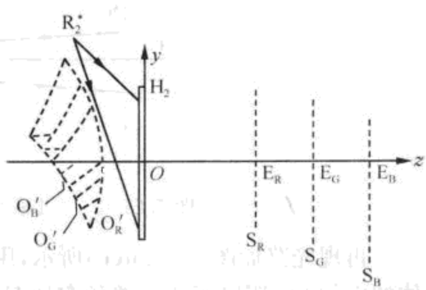


图 5.21.4

彩虹全息图的特点:由于记录全息图 H_2 时,物光束受狭缝 S 的限制,只是一束细光束投射到 H_2 上,因而对应一个物点 O_1 的信息在全息图的 y 方向上只占了一小部分 ΔH_1. 对于这一部分全息图,也可以叫做线全息图(图 5.21.5). 设狭缝的宽度为 a,狭缝与 H_2 的距离为 z_S,则线全息图的宽度为

$$\Delta H = \frac{|z_0| a}{|z_0| + z_S} \tag{5.21.3}$$

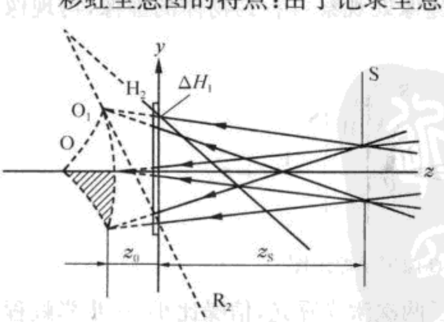


图 5.21.5

由于一个物点的全息图的大小在 y 方向(铅直方向)受到限制,在 x 方向(水平方向)不

受限制，这样再现像在 y 方向便失去了体视感，在 x 方向仍有体视感.

2）一步彩虹全息

彩虹全息图的本质是要在观察者与物体的再现像之间形成一个狭缝像，使观察者通过狭缝像看到物体的像，以实现白光再现单色像. 一步彩虹全息是利用一个透镜同时把物体和狭缝的像一次记录下来. 由于狭缝放置的位置不同，一步彩虹全息图的记录光路有两种：一种是赝像记录光路，一种是真像记录光路.

赝像记录原理如图 5.21.6(a)所示. 物体 O_1 置于透镜 L 的二倍焦距处，狭缝 S 位于第一焦点 F 以内，在第一焦点外形成虚像 S′. 在透镜的另一侧记录全息图，用会聚光做参考光 R.

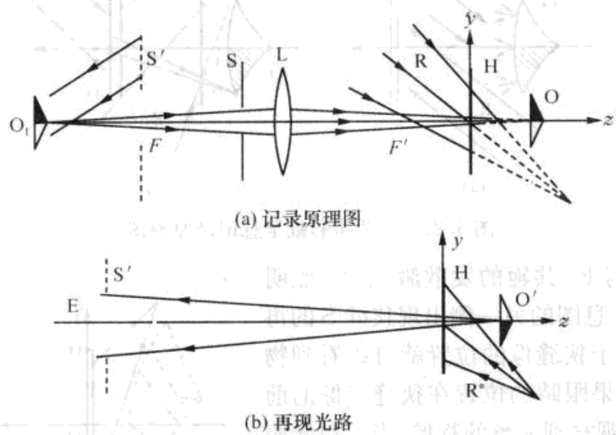


图 5.21.6　一步彩虹全息图赝像记录原理图与再现光路

再现光路如图 5.21.6(b)所示，用 R 的共轭光 R^* 照明再现，形成狭缝的实像 S′和物体的虚像 O′，眼睛置于狭缝的实像 E 处，可观察到物体的虚像. 这个像是一个赝像，即再现象的凹凸与物体正好相反，因而这一光路只适合记录二维平面物体.

真像记录原理如图 5.21.7 所示. 狭缝 S 和物体 O_1 均放在透镜 L 的焦点以外，狭缝位于物体和透镜之间. 成像透镜对物体和狭缝均成实像，二者的像均在透镜的另一侧，物体的实像 O_1' 和狭缝的实像 S′分别成在全息干板 H 的两侧，且 O_1' 离全息干板近一些. 再现时，用与原参考光方向相同的光照明，眼睛在狭缝像处观察可看到物体的虚像，再现像不再是赝视的.

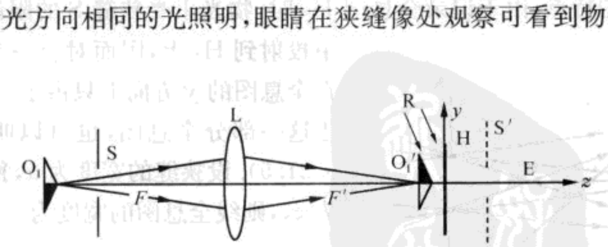


图 5.21.7　一步彩虹全息图真像记录原理图

二步彩虹的优点是视场大，但程序较复杂，用了两次激光曝光，信噪比小. 一步彩虹程序简单，信噪比较高，但视场受到成像透镜大小的限制. 针对一步彩虹视场受成像透镜大

小限制的缺点，可以采取几种办法补救：①使用大相对孔径的照相镜头作为成像透镜；②在全息干板 H 之前加一个场镜；③采用某些改进光路，如像散彩虹全息，无透镜、无狭缝一步彩虹全息等.

【实验器材】

He-Ne 激光器、全息工作台、光开关、反射镜、连续可调分束器、扩束镜、准直透镜、成像透镜、狭缝、被摄物体、全息干板、孔屏、白屏、干板架、载物台、毛玻璃、曝光定时器、光强测量仪、暗室设备.

【实验内容】

1. 制作像面全息图

采用如图 5.21.1 所示的实验光路，用透镜成像记录方式制作像面全息图. 具体步骤如下：

(1) 点燃激光器，调整激光光束与工作台面平行，用自准直法调整各光学元件表面与激光束的主光线垂直.

(2) 如图 5.21.1 所示，依次加入光学元件，注意下列各点：①光路中透镜 L_1 和物体 O 的距离以两倍焦距为最佳，否则像有不同程度的失真；②把毛玻璃架在干板架上，在透镜另一侧 2 倍焦距附近移动，让像成在毛玻璃上或其附近；③使物光与参考光等光程；④物光与参考光光强比在 1∶4～1∶1 之间选择；⑤物光与参考光夹角在 30°～60°间选择；⑥参考光均匀覆盖整个干板，与物光重合好.

(3) 关闭光开关，取下毛玻璃，换上全息干板，选择合适的曝光时间，用曝光定时器控制光开关曝光.

(4) 取下已曝光的全息干板，在暗室进行常规显影、定影、水洗、干燥等处理.

(5) 用白炽灯或聚光灯按拍摄时参考光的方向照明全息图，在透射光的方向，可观察到清晰的像.

2. 制作一步彩虹全息图

制作一步彩虹全息图的实验光路有两种：①赝像记录光路如图 5.21.8 所示；②真像记录光路如图 5.21.9 所示.

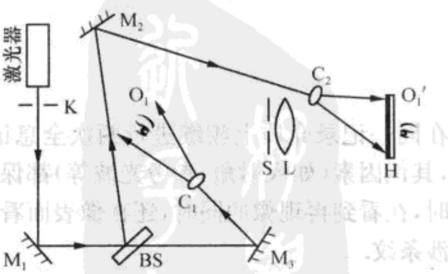


图 5.21.8

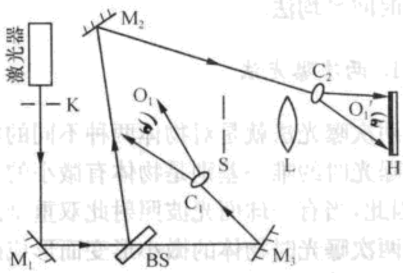


图 5.21.9

(1) 在两种实验光路中任选一种，自行设计实验步骤，制作三张一步彩虹全息图. 要求成像面分别位于全息图平面内、全息图之前和全息图之后.

(2) 分别用单色光和白光源再现彩虹全息像，观察物的像和狭缝的像，并仔细观察三张彩虹全息图像的位置差异.

(3) 白光再现时，若将全息图从原记录方位旋转 90°，然后将眼睛放在适当位置观察再现像，当眼睛上下移动时，看到了什么？当离全息图较近时，再现像的颜色有何变化？

【习题】

(1) 物体三维全息图具有可破碎性，即用其中一小块能再现出一个完整无缺的虚像. 像面全息图具有可破碎性吗？为什么？

(2) 一步彩虹全息图和像面全息图的白光再现像有什么不同，为什么？

(3) 记录一步彩虹全息图时，对光路设计、成像透镜、狭缝、参考光源和再现光源各有什么要求，应如何选择？

实验 5.22　全息干涉计量

全息干涉计量是人们在大量全息照相的实践中发现并发展起来的一门崭新的光学干涉技术. 它是全息照相工程应用的一个重要方面，它不但具有普通光学干涉计量相同的测量精度(达到光波波长的数量级)，而且还具有对测试样品要求低、适应面广、测试结果精密直观、测试设备通用性强、光学系统精度要求不高、能实现非接触测量等优点，目前已广泛应用于无损检验、微小变形或振动的检测，弹道、流场显示以及光学信息的处理和变换等领域，有着广阔的应用前景.

本实验要求掌握二次曝光法和时间平均法全息干涉术的基本原理；用二次曝光法测定膜片的位移或模拟悬臂梁的离面位移量；用时间平均法分析膜片的振动模式.

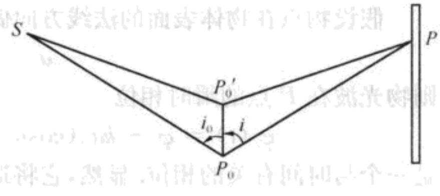
【实验原理】

全息干涉计量的基本方法有单次曝光全息干涉法(即实时法)、两次曝光全息干涉法、时间平均全息干涉法(即连续曝光法)和“双波长”全息干涉法等. 本实验只讨论两次曝光法和时间平均法.

1. 两次曝光法

两次曝光法就是对物体两种不同的状态在同一记录介质上相继进行两次全息记录. 两次曝光时的唯一差别是物体有微小的形变，其他因素(如入射角、参考光波等)都保持不变. 因此，当有一球面光波照射此双重全息图时，在看到再现像的同时，还在像表面看到了由于两次曝光时物体的微小形变而形成的干涉条纹.

如图 5.22.1 所示，设物点 P_0 沿着$\overrightarrow{P_0P_0'}$运动，入射光束与$\overrightarrow{P_0P_0'}$的交角为 i_0，衍射光束



S. 照明物体的光束的会聚点；$\overrightarrow{P_0P_0'}$. 位移矢量

图 5.22.1

与$\overrightarrow{P_0P_0'}$的交角为 i. 第一次曝光时，物点位于 $P_0(x_0,y_0,z_0)$处，第二次曝光时物点已从 P_0 点沿 $\overrightarrow{P_0P_0'}$ 方向移动到 $P_0'(x_0',y_0',z_0')$，$\overrightarrow{P_0P_0'}=a$，如位移 $a\ll\overrightarrow{SP_0}$ 和 $\overrightarrow{P_0P}$，由图 5.22.1 可知，$\overrightarrow{SP_0}-\overrightarrow{SP_0'}\approx a\cos i_0$，$\overrightarrow{P_0P}-\overrightarrow{P_0'P}\approx a\cos i$，物点由 P_0 点移到 P_0'引起的位相的总减量是 $ka(\cos i_0+\cos i)$，式中 $k=2\pi/\lambda$. 两次曝光中物光波的复振幅是

$$O(P_0,P)=O_0(P_0)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_0}$$

$$O'(P_0',P)=O_0'(P_0')\mathrm{e}^{\mathrm{j}[\varphi_0-ka(\cos i_0+\cos i)]}$$

参考光波保持不变，即

$$R(P_R,P)=R_0(P_R)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_R}$$

则 P 点的光强分别为

$$I_1=|O+R|^2,\quad I_2=|O'+R|^2$$

设曝光时间分别为 T_1 和 T_2，总曝光量 $H=I_1T_1+I_2T_2$. 经处理后全息图的振幅透射率为

$$t=\alpha+\beta H=\alpha+\beta(I_1T_1+I_2T_2)$$

若用一光波 $L(P_2,P)=L_0(P_2)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_L}$ 照明全息图，将得到两个再现光波

$$D_{+1}(P)=\beta T_1O_0R_0^*L_0\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\varphi_0-\varphi_R+\varphi_L)}=A_1\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_1}\tag{5.22.1}$$

$$D_{+2}(P)=\beta T_2O_0'R_0^*L_0\mathrm{e}^{\mathrm{j}[\varphi_0-\varphi_R+\varphi_L-ka(\cos i_0+\cos i)]}=A_2\mathrm{e}^{\mathrm{j}[\varphi_1-ka(\cos i_0+\cos i)]}\tag{5.22.2}$$

这两个光波将在同一方向上传播，并且在同一位置上形成像点，像点的总光场的复振幅 $D_+=D_{+1}+D_{+2}$. 合成光强是

$$|D_+|^2=|A_1|^2+|A_2|^2+2|A_1||A_2|\cos[ka(\cos i_0+\cos i)]\tag{5.22.3}$$

式中，a、i_0 和 i 都是物点位置(x_0,y_0,z_0)的函数. 两光波的相位差为 $ka(\cos i_0+\cos i)$，它决定像点的光强$|D_+|^2$ 的大小. 对于许多物点组成的物体，具有相同相位差的物点的再现像点的集合将形成干涉条纹，因此，在再现像上将出现明暗相间的干涉条纹. 对于具有位移量

$$a=\frac{(2m+1)\lambda}{2(\cos i_0+\cos i)}\quad(m=\text{整数})\tag{5.22.4}$$

的物点，再现像点的亮度极小.

2. 时间平均法

如果把多次曝光法推广至连续曝光法这一极限情况，就得到"时间平均全息干涉术". 对于一个振动物体，用比它的振动周期长得多的时间连续曝光，拍摄物体三维的全息图，就能把振动物体在曝光时间内所取得的每一位置的物光波都记录在同一张干板上，再现时，每一张全息图再现出一个物光波，所有这些再现的物光波一一相互错开并相互干涉，形成干涉条纹，这就是时间平均全息图. 时间平均全息图记录的是物体振动的模式，也就是全息图平面上幅照度分布的时间平均效果. 物体在振动过程中，其表面上会产生振动的驻波，在波节附近，物体的位移很小，在节点的位置上，物体不动；而在波腹处，物体的位移很大(即振幅大). 因此，根据干涉条纹的形状和强度分布，可以分析出振动的模式并计算物体表面各点的振幅.

假设物点在物体表面的法线方向做正弦振动，其频率为ν_0，位移为

$$a = a_0\sin(2\pi\nu_0 t + \theta)$$

则物光波在P点的瞬时相位

$$\varphi_0(t) = \overline{\varphi_0} - ka_0(\cos i_0 + \cos i)\sin(2\pi\nu_0 t + \theta) = \overline{\varphi_0} + \Delta\varphi(t) \tag{5.22.5}$$

是一个与时间有关的相位. 显然，它将造成记录过程中底片上干涉条纹的不断移动，使拍摄到的条纹的对比度下降. 把物光波和参考光波写为

$$O(P_0, P) = O_0 e^{j[\overline{\varphi_0} + \Delta\varphi(t)]},\quad R(P_R, P) = R_0 e^{j\varphi_R}$$

设曝光时间为T，则全息图的振幅透射率

$$t = \alpha + \beta\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |O + R|^2 dt$$

仍用$L(P_L, P) = L_0 e^{j\varphi_L}$来照明全息图，在透射光中形成再现像的光波是

$$D_+(P) = \left[\beta\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} R_0^* O_0 e^{j[\overline{\varphi_0} + \Delta\varphi(t) - \varphi_R]} dt\right] \cdot L_0 e^{j\varphi_L}$$

在振动频率ν_0和曝光时间T的数值能使$\nu_0 T \gg 10^2$的数量级时，即得再现光波的复振幅(推导见附录 I)

$$D_+(P) = 2\beta T R_0^* O_0 L_0 J_0[ka_0(\cos i_0 + \cos i)] \cdot e^{j(\overline{\varphi_0} - \varphi_R + \varphi_L)} \tag{5.22.6}$$

由此可见，再现光波的振幅将主要由第一类零阶贝塞尔函数$J_0[ka_0(\cos i_0 + \cos i)]$调制. 如果已知振动物体的某些点的位移$a = 0$，那么这些点必位于同一条纹的极大光强处. 以后，只要查得使$J_0(x') = 0$的x'值，从(5.19.6)式可知，用公式

$$ka_0(\cos i_0 + \cos i) = x' \tag{5.22.7}$$

求得对应的各个a_0值，这些a_0值就是与各级暗条纹所对应的物点的振幅. 现将$J_0(x') = 0$的前 10 个根列出：

$x'_{1,2,\cdots,10} = 2.405; 5.520; 8.654; 11.792; 14.931; 18.071; 21.212; 24.353; 27.494; 30.635$

由(5.19.6)式还可知道，再现像的强度将比于$|\beta R_0 L_0 O_0 T|^2 \cdot |J_0(x')|^2$，由于$|J_0(x')|^2$的极大值随$x'$的增大而减小，所以条纹的极大光强也随着$a_0$的增加而减小.

3. 一束光全息干涉的位移场分析

两次曝光法在本实验中的一个具体应用，是利用反射式体积全息图测量模拟悬臂梁的位移量. 有关反射式体积全息图的原理参看实验 4.12，下面仅对悬臂梁的面内位移和离面位移进行分析.

模拟悬臂梁是一个长方形钢条，将它一端固定(悬臂梁和固定夹板经过精磨)，固定时要平面接触，另一端用砝码加载，造成悬臂梁变形.

使全息干板 H 平行于试样表面放置，并用一束平行光垂直入射，如图 5.22.2 所示.

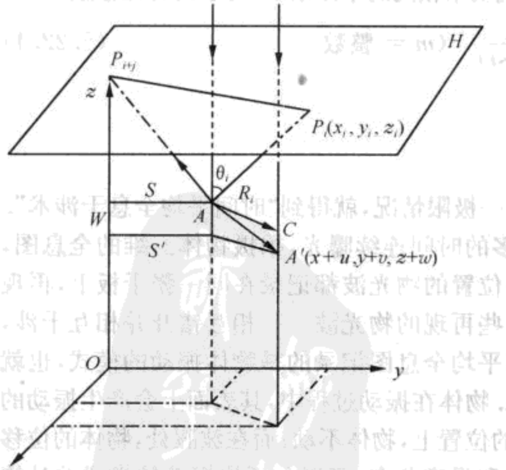


图 5.22.2

设 A、A' 为试样表面上变形前后的一对应点，$\overline{CA'}=W$

$$\overline{AP_i}=R_i=[(x-x_i)^2+(y-y_i)^2+(z-z_i)^2]^{1/2}$$

沿 θ_i 角观察时，P_i 点的光程差为

$$\begin{aligned}\Delta_i&=(\overline{CA'}+\overline{A'P_i})-\overline{AP_i}=-W+\{[(x+u)-x_i]^2+[(y+v)-y_i]^2\\&\quad+[(z+w)-z_i]^2\}^{1/2}-R_i=-W+[R_i^2+2(x-x_i)u+2(y-y_i)v\\&\quad+2(z-z_i)w+u^2+v^2+w^2]^{1/2}-R_i\end{aligned}$$

略去高阶小量，并按二项式展开得

$$\begin{aligned}\Delta_i&=-W+R_i+\frac{x-x_i}{R_i}u+\frac{y-y_i}{R_i}v+\frac{z-z_i}{R_i}w-R_i\\&=-W+\frac{x-x_i}{R_i}u+\frac{y-y_i}{R_i}v+\frac{z-z_i}{R_i}w\end{aligned}\tag{5.22.8}$$

若令 A 点为坐标原点，即 $x=y=z=0$，则(5.22.8)式简化为

$$\Delta_i=-W-\frac{1}{R_i}(x_iu+y_iv+z_iw)$$

对于平面应力问题，因全息干板安放时与试样表面平行，故在平面 H 上任意点的 z 坐标相等，即 $z_{i+1}=z_i$。

若从另一点 P_{i+j} 来观察，且 P_{i+j} 点相对于平行 z 轴的 AB 轴来说与 P_i 对称，即 $x_i=-x_{i+j}$，$y_i=-y_{i+j}$。此时用条纹记数法求得 P_{i+j} 与 P_i 的光程差为

$$\begin{aligned}\Delta_{i+j}-\Delta_i&=\frac{u}{R_i}(x_{i+j}-x_i)+\frac{v}{R_i}(y_{i+j}-y_i)+\frac{w}{R_i}(z_{i+j}-z_i)\\&=\frac{u}{R_i}(x_{i+j}-x_i)+\frac{v}{R_i}(y_{i+j}-y_i)=\frac{2x_{i+j}}{R_i}u+\frac{2y_{i+j}}{R_i}v\end{aligned}\tag{5.22.9}$$

此时再使坐标系绕 z 轴旋转，使 x 轴与上述两观察方向构成之平面平行，即 P_i 点和 P_{i+j} 点在新坐标系中位于 xz 平面上，$y_i=y_{i+j}=0$，则(5.22.9)式可写为

$$\Delta_{i+j}-\Delta_i=\frac{2x_{i+j}}{R_i}u=2u\sin\theta_i\tag{5.22.10}$$

当观察者由 P_i 点观察 A 改变为由 P_{i+j} 点观察 A 时，移过 A 点的干涉条纹数为 N，即

$$\Delta_{i+j}-\Delta_i=N\lambda$$

由(5.22.10)式有

$$N\lambda=2u\sin\theta$$

$$u=\frac{N\lambda}{2\sin\theta_i}\tag{5.22.11}$$

由上式可以看出，只要计量出观察角度 θ_i 的值，并计数出改变观察方向至另一对称位置时移过的条纹数 N，即可由(5.22.11)式求出试件面内位移量 u。

若使观察方向与入射方向基本上一致，即也在大约垂直于试件表面的方向观察时，因 $z_i=R_i$，由(5.22.8)式可得 $\Delta_i=-2W$。

若此时观察到的是 m 级干涉条纹，则有

$$\Delta_i=-2W=m\lambda$$

$$W = -\frac{m}{2}\lambda \tag{5.22.12}$$

由(5.22.12)式看出，试件的离面位移量 W 由所看到的干涉条纹级数 m 决定.

【实验内容】

1. 测量形变形式及振动模式

用全息干涉术测量在耳机加直流电压时膜片的形变形式，及在耳机加交流电压时膜片的振动模式

用拍摄漫反射物体全息图的实验光路，分别采用两次曝光法和时间平均法拍摄耳机膜片的全息图. 拍摄前，用量角器测定膜片上激光束的入射角 i_0 和衍射角 i(提示：位移矢量$\overrightarrow{P_0P_0'}$在膜片表面的法线方向上)，并记录耳机电压的数值和其他实验条件的数据.

观察再现像(包括干涉条纹的形状、间距和条纹可见度)，测绘出在耳机膜片上的等位移曲线和等振幅曲线分布图. 每条曲线要求标出它的位移 $a(m)$或振幅 $a_0(x_i')$的数值(提示：膜片的边缘因有外套压紧而无位移).

改变实验条件(即改变直流电压、交流电压幅值或频率值，具体要求见实验卡片)，拍摄不同条件下的全息图，观察再现像并对不同条件下的实验结果进行分析比较.

为了获得满意的全息干涉照片，应注意以下各点：

(1) 整个拍摄系统严格防震.

(2) 布置光路时，物光与参考光的光程要尽量相等，物光与参考光的夹角控制在30°～60°.

(3) 参考光与物光光强比要选择适当(1∶1～4∶1)，并根据实际的总光强选择正确的曝光时间.

(4) 在两次曝光或连续曝光过程中，被摄物体、光路系统和全息干板之间的相对位置不能发生移动；特别应注意要用固定在全息台上的台钳夹紧被摄物体.

(5) 正确控制全息干板的冲洗条件.

2. 用两次曝光法测量模拟悬臂梁的离面位移量

实验光路按如图 5.22.3 所示布置. 将带有钢尺的干板支架和悬臂梁一起稳妥可靠地夹持在防震台上的台钳中，注意使悬臂梁根部夹入足够的深度(不少于 2cm)，并应使梁长方向与钢尺平行且留有一定空隙(约 1mm).

采用一个倒置望远镜将 He-Ne 激光扩束并产生平行光(用平板剪切法检查光束平行度，见附录Ⅱ)，调整反射镜 M_2(实际光路中采用了两个反射镜和支架，用图中未画出的 M_3 将水平方向的平行光转向后射到 M_2 上)，使该平行光束近似垂直投射到全息干板上.

用砝码加载时曝光一次，细心地去掉砝码再曝光一次(两次曝光之间，整个光路系统，包括全息干板等均应保持原状，不得触动、移位或振动). 经暗室处理，得到一张反射式体积全息图. 全息图用白光再现，观察干涉条纹间距随离根部的距离而变化的规律，并注意在视场所及的其他被摄物再现像上有无干涉条纹存在. 若有则说明什么？它们的存在对实验结果有无影响？用(5.22.12)式计算出距根部一定距离处悬臂梁的离面位移量.

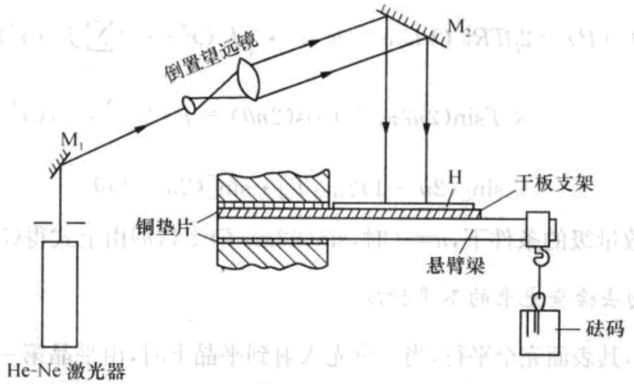


图 5.22.3

【附录】

1. (5.22.6)式的推导

$$D_+(P)=\left[\beta\int_{-T/2}^{T/2}R_0^*O_0\mathrm{e}^{\mathrm{j}[\overline{\varphi_0}+\Delta\varphi(t)-\varphi_R]}\mathrm{d}t\right]\cdot L_0\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_L}$$

$$=\beta R_0^*O_0L_0\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\overline{\varphi_0}-\varphi_R+\varphi_L)}\cdot\int_{-T/2}^{T/2}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}ka_0[(\cos i_0+\cos i)\cos(\omega_0t+\theta)]}\cdot\mathrm{d}t$$

令 $ka_0(\cos i_0+\cos i)=x'$，利用贝塞尔函数展开式，有

$$\cos[x'\sin(2\pi\nu_0+a)]$$

$$=J_0(x')+2\sum_{n=1}^{\infty}J_{2n}(x')\cos[2n(2\pi\nu_0t+\theta)]$$

$$=J_0(x')+2\sum_{n=1}^{\infty}J_{2n}(x')[\cos(2n\cdot2\pi\nu_0t)\cos(2n\theta)-\sin(2n\cdot2\pi\nu_0t)\sin(2\pi\theta)]$$

$$\sin[x'\sin(2\pi\nu_0t+\theta)]$$

$$=2\sum_{n=0}^{\infty}J_{2n+1}(x')\sin[(2n+1)(2\pi\nu_0t+\theta)]$$

$$=2\sum_{n=0}^{\infty}J_{2n+1}(x')\{\sin[(2n+1)2\pi\nu_0t]\cdot\cos[(2n+1)\theta]$$

$$+\cos[(2n+1)2\pi\nu_0t]\sin[(2n+1)\theta]\}$$

由于 $\sin(n2\pi\nu_0t)$ 是 t 的奇函数，故

$$\int_{-T/2}^{T/2}\sin(n2\pi\nu_0t)\cdot\mathrm{d}t=0$$

且有

$$\int_{-T/2}^{T/2}\cos(n2\pi\nu_0t)\cdot\mathrm{d}t=T\sin(n2\pi\nu_0T)$$

于是

$$D_+(P) = 2\beta T R_0^* O_0 L_0 e^{j(\varphi_0 - \varphi_R + \varphi_L)} \cdot \Big\{ J_0(x') + 2\sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(x')$$

$$\times T\sin(2n2\pi\nu_0 T)\cos(2n\theta) - J \cdot 2\sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(x') T$$

$$\times \sin[(2n+1)2\pi\nu_0 T] \cdot \sin[(2n+1)\theta] \Big\}$$

在 $\nu_0 T \geqslant 10^2$ 的数量级的条件下，$n \neq 0$ 时，$\sin(n2\pi\nu_0 T) \ll 1$，即由上式得(5.22.6)式.

2. 平板剪切法检查光束的不平行度

若有一平晶，其表面完全平行，当一束光入射到平晶上时，由平晶第一表面和第二表面反射的光在重叠区域产生干涉条纹，如图 5.22.4 所示.

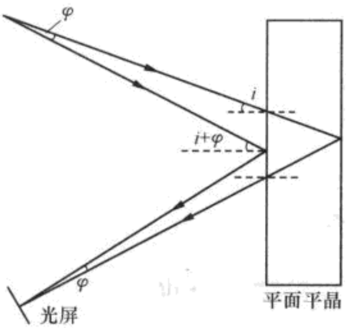


图 5.22.4

干涉条纹的间距由公式 $d = \lambda / 2\sin\varphi/2$ 决定. 因 φ 角很小，故有 $\varphi = \lambda / d$.

入射光束的不平行度 φ 越小，则干涉条纹的间距 d 越大. 当入射光为平行光时，$\varphi = 0$，则条纹间距 d 为无穷大，干涉场将一片明亮. 实际上干涉条纹间距为 50mm 左右时，光束的不平行度只有 2″左右，这已是较理想的平行光波了. 因此，当用一块平面平晶放置在待检验的光路上，并用屏接收由平晶两表面反射的光斑时，可见到干涉条纹；然后改变光束的不平行度，使条纹间距增大. 当屏上只有 1～2 个条纹后，图 5.22.4 入射光束已被调成平行光.

实验 5.23　用光学多道分析器研究氢原子光谱

光谱是光的频率成分和强度分布的关系图，是研究物质微观结构的重要途径之一. 它广泛应用于化学分析、医药、生物、地质、冶金、考古等部门. 常用的光谱有吸收光谱、发射光谱和散射光谱，涉及的波长从 X 射线、紫外光、可见光、红外光到微波和射频波段. 本实验通过测定氢原子在可见光波段的发射光谱，使大家了解光谱与微观结构(能级)间的联系和光谱测量的基本方法.

【实验目的】

(1) 测定氢原子巴耳末系发射光谱的波长和氢的里德伯常量.

(2) 了解氢原子能级与光谱的关系，画出氢原子能级图.

(3) 了解光学多通道分析器的原理和使用方法.

【实验原理】

如图 5.23.1 所示为氢原子的能级图. 根据玻尔理论，氢原子的能级公式为

$$E(n) = -\frac{\mu e^4}{8\varepsilon_0^3 h_2} \cdot \frac{1}{n^2} \quad (n = 1,2,3,\cdots) \tag{5.23.1}$$

式中，$\mu = m_e/(1+m_e/M)$ 称为约化质量，m_e 为电子质量，M 为原子核质量. 氢原子的 M/m_e 等于 1836.15.

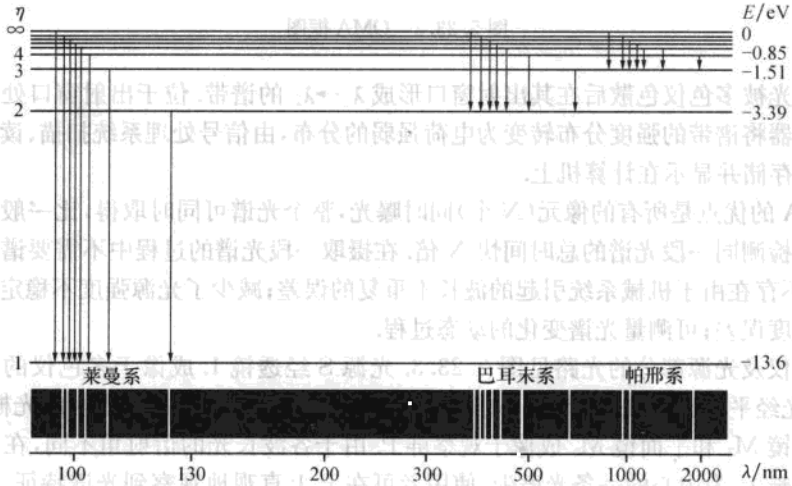


图 5.23.1　氢原子能级图

电子从高能级跃迁到低能级时，发射的光子能量 $h\nu$ 为两能级间的能量差

$$h\nu = E(m) - E(n) \quad (m > n) \tag{5.23.2}$$

如以波数 $\sigma = 1/\lambda$ 表示，则上式为

$$\sigma = \frac{E(m)-E(n)}{hc} = T(n) - T(m) = R_H\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right) \tag{5.23.3}$$

式中，R_H 称为氢原子的里德伯常量，单位是 m^{-1}，$T(n)$ 称为光谱项，它与能级 $E(n)$ 是对应的. 从 R_H 可得氢原子各能级的能量

$$E(n) = -R_H ch \cdot \frac{1}{n^2} \tag{5.23.4}$$

式中，$h = 4.13567\times10^{-15}\,eV\cdot s$，$c = 2.99792\times10^8\,m\cdot s^{-1}$.

从图 5.23.1 可知，从 $m \geqslant 3$ 至 $n = 2$ 的跃迁. 光子波长位于可见光区，其光谱符合规律

$$\sigma = R_H\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}\right) \quad (m = 3,4,5,\cdots) \tag{5.23.5}$$

这就是 1885 年巴耳末发现并总结的经验规律，称为巴耳末系. 氢原子的莱曼系位于紫外，其他线系均位于红外.

【仪器介绍】

光学多通道分析器(Optical Multichannel Analyzer，OMA)是利用现代电子技术接收

和处理某一波长范围($\lambda_1 \to \lambda_2$)内光谱信息的光学多通道检测系统,其基本框图如图 5.23.2 所示.



图 5.23.2 OMA 框图

入射光被多色仪色散后在其出射窗口形成 $\lambda_1 \to \lambda_2$ 的谱带. 位于出射窗口处的多通道光电探测器将谱带的强度分布转变为电荷强弱的分布,由信号处理系统扫描、读出、经 A/D 变换后存储并显示在计算机上.

OMA 的优点是所有的像元(N 个)同时曝光,整个光谱可同时取得,比一般的单通道光谱系统检测同一段光谱的总时间快 N 倍. 在摄取一段光谱的过程中不需要谱仪进行机械扫描,不存在由于机械系统引起的波长不重复的误差;减少了光源强度不稳定引起的谱线相对强度误差;可测量光谱变化的动态过程.

多色仪及光源部分的光路见图 5.23.3. 光源 S 经透镜 L 成像于多色仪的入射狭缝 S_1,入射光经平面反射镜 M_1 转向 90°,经球面镜 M_2 反射后成为平行光射向光栅 G. 衍射光经球面镜 M_3 和平面镜 M_4 成像于观察屏 P. 由于各波长光的衍射角不同,在 P 处形成以某一波长 λ_0 为中心的一条光谱带,使用者可在 P 上直观地观察到光谱特征. 转动光栅 G 可改变中心波长,整条谱带也随之移动. 多色仪上有显示中心波长 λ_0 的波长计. 转开平面镜 M_4 可使 M_3 直接成像于光电探测器 CCD 上,它测量的谱段与观察屏 P 上看到的完全一致.

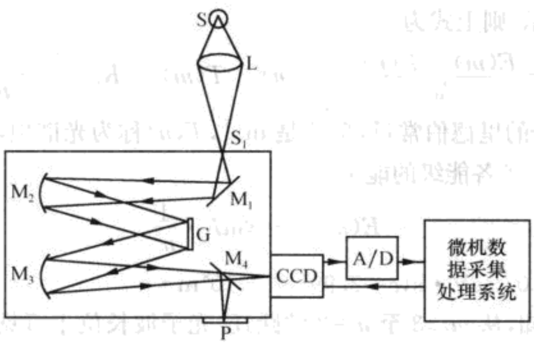


图 5.23.3

CCD 是电荷耦合器件(Charge-Coupled Device)的简称,是一种以电荷量表示光强大小、用耦合方式传输电荷量的器件,它具有自扫描、光谱范围宽、动态范围大、体积小、功耗低、寿命长、可靠性高等优点. 将 CCD 一维线阵放在光谱面上,一次曝光就可获得整个光谱. 目前,二维面阵 CCD 已大量用于摄像机和数字照相机.

CCD 的结构如图 5.23.4 所示,衬底是 P 型 Si,硅表面是一层二氧化硅薄膜,膜上有一层金属作为电极,这样硅和金属之间形成一个小电容. 如果金属电极置于高电位,在金

属界面积累了一层正电荷，P 型半导体中带正电荷的空穴被排斥，只剩下不能移动的带负电荷的受主杂质离子，形成耗尽层，受主杂质离子因不能自由移动对导电作用没有任何贡献. 在耗尽区内或附近，由于光子的作用产生电子-空穴对，电子被吸引到半导体与 SiO_2 绝缘体的界面形成电荷包，这些电子是可以传导的. 电荷包中电子的数目与入射光强和曝光时间成正比，很多排列整齐的 CCD 像元组成一维或二维 CCD 陈列，曝光后一帧光强分布图将成为一帧电荷分布图.

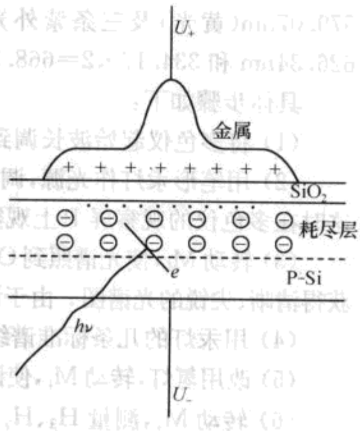


图 5.23.4 CCD 示意图

我们采用的是具有 2048 个像元的 CCD 一维线阵，其光谱响应范围为 200～1000nm，响应峰值在 550nm，动态范围大于 2^{10}. 每个像元的尺寸为 $14\mu m \times 14\mu m$，像元中心距为 $14\mu m$，像敏区总长为 28.672mm. 多色仪中 M_2，M_3 的焦距为 302mm，光栅常数为 1/600mm，在可见光区的线色散 $\Delta\lambda/\Delta l$（光谱面上单位宽度对应的波长范围）约为 $5.55nm \cdot mm^{-1}$，由此可知 CCD 一次测量的光谱范围为 5.55×28.67nm，约为 159nm. 光谱分辨率即两个像元之间波长相差约 0.077nm. 在 OMA 中每个像元称为一"道"，本实验系统是 2048 道.

每次采样(曝光)后每个像元内的电荷在时钟脉冲的控制下顺序输出，经放大、模数(A/D)转换，将电荷量即光强顺序存入采集系统(微机)的寄存器，经微机处理后，在显示器上就可看到我们熟悉的光谱图. 移动光谱图上的光标，屏上即显示出光标所处的道数和相对光强值.

使用者可通过屏幕提示来操作采集系统，一般操作界面主窗口下包括的菜单项有

(1) 文件：主要提供文件打开/关闭、结果打印和程序退出等功能.

(2) 运行：主要包含一些数据采集子菜单项，如实时采集、背景采集和改变起始波长等.

(3) 数据处理：主要提供对采集到的光谱数据进行操作处理的功能，如定标、平滑、扩展、数据读取和两谱图的加减等. 定标就是用光标从光谱中找出各已知波长的谱峰所处的道数，并输入相应的波长值，计算机用最小二乘法拟合道与波长的关系，拟合后横坐标由原来的道数标度变为波长标度.

(4) 设置：用来修改 CCD 的工作参数和显示模式，如曝光时间、平均次数、累加次数和显示范围等. 增加曝光时间、平均次数和累加次数可增加信噪比和提高弱峰的计数，但设置曝光时间时要考虑 CCD 动态范围的限制.

(5) 帮助：提供在线帮助. 其他详细说明见仪器说明书.

【实验内容】

因为 H_α 线的波长为 656.28nm，H_δ 线为 410.17nm，波长间隔达 246nm，超过 CCD 一帧 159nm 的范围，所以要分两次测量. 第一次测量 H_β、H_γ 和 H_δ 三条线，第二次单独测量 H_α 线. 第一次测量时用汞灯的 546.07nm(绿光)、435.84nm(蓝光)、404.66nm(紫光)等谱线作为标准谱线来定标；第二次用汞灯的 546.07nm(绿光)、576.96nm(黄光)、

579.07nm(黄光)及三条紫外光的二级光谱线 312.567×2=625.13nm、313.17×2=626.34nm 和 334.17×2=668.34nm 来定标.

具体步骤如下：

(1) 将多色仪起始波长调到 390nm,入射狭缝 S_1 的宽度为 0.1mm.

(2) 用笔形汞灯作光源,调节 L、S 与多色仪共轴,并令光源 S 成大像于入射狭缝处.这时在多色仪的观察屏 P 上观察到清晰、明亮的水银谱线.

(3) 转动 M_4,使光谱照到 CCD 上.调节入射狭缝,使谱线变锐,选择适当的曝光时间以获得清晰、尖锐的光谱图.由于谱线强度不同,对不同的谱线可选用不同的曝光时间.

(4) 用汞灯的几条标准谱线定标,使横坐标表示波长(nm).

(5) 改用氢灯,转动 M_4,使谱线成像在观察屏 P 上,调节氢灯的位置,使谱线强度最强.

(6) 转动 M_4,测量 H_β、H_γ、和 H_δ 的波长.

(7) 将多色仪的起始波长调至 540nm,用汞灯定标后,测出 H_α 线的波长.

【数据处理】

(1) 列出数据表.

	H_α	H_β	H_γ	H_δ
m				
λ/nm				
δ/m^{-1}				
$-1 \cdot m^{-2}$				

(2) 根据(5.23.3)式用线性拟合求出 R_H,直线拟合公式见第 1 章(1.24)式、(1.26)式、(1.27)式.

(3) 根据(5.23.4)式画出 $n=1,2,3,\cdots,6$ 及 $n=\infty$ 的能级图,单位用 eV,小数后取 2 位,并标出 H_α、H_β、H_γ 和 H_δ 各线是对应哪两个能级的跃迁.

实验 5.24　用偏光显微镜研究液晶的相变及光学特性

液晶是介于液体与晶体之间的一种物质状态.一般的液体内部分子排列是无序的,而液晶既具有液体的流动性,其分子又按一定规律有序排列,使它呈现晶体的各向异性.当光通过液晶时,会产生偏振面旋转,双折射等效应.

本实验要求在了解液晶的结构和基本性质的基础上,用偏光显微镜研究液晶的一些光学特性,测定单轴液晶的光性符号和热致液晶的相变温度.

【实验原理】

液晶具有液体的一些特征,如流动性、不能承受切变力、可以形成液滴等,同时又具有晶体的某些特征,如分子的取向有序性;一些物理参数,如光折射率、介电常数、电阻率、磁化率、黏滞系数、弹性系数等均为各向异性.液晶在正交偏光显微镜下可以看到强烈的双

折射现象，随着加热过程中液晶的相变，可以用偏光显微镜观察到不同的织构(Texture).

通常按液晶相变形成的原因可将液晶分为两大类别：热致液晶(由于温度变化而导致液晶相变)和溶致液晶(由于溶液浓度而导致液晶相变). 下面仅对本实验涉及到的热致液晶加以讨论.

1. 热致液晶的结构和分类

一般组成热致液晶态的分子大多是杆状的，分子的长度和直径之比为4∶1～8∶1，相对分子质量一般在200～500单位. 这些有机化合物多数具有可极化的、平面形的刚性芳香核，在靠近分子中心，或沿着分子轴向有强极性基团，有的是在分子的末端有微弱极性基团.

最早是Friedel把热致液晶分为三类，分别命名为：

英文名	化学译名	物理译名	本书用名
Nematic	向列型	丝状	丝状
Cholesteric	胆甾型	—	螺旋状
Smestic	近晶型	脂状	层状

但从结构上看胆甾型是向列型的变种，所以又把热致液晶分为两大类：丝状液晶和层状液晶.

1) 丝状液晶

(1) 普通向列型结构.

这种液晶的结构如图5.24.1所示. 它的结构有两个特点：①分子的长轴取向有长程有序性，即分子长轴的取向基本上是平行的；②分子的质心没有长程有序，即质心的分布是混乱的.

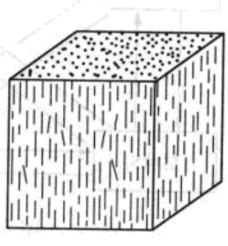


图5.24.1

分子在液晶盒中可以受其表面作用而取向. 如果液晶盒内表面是摩擦过的，则分子长轴倾向于摩擦方向排列. 另外，使用某些表面活性剂稀释液处理的表面，可能使分子长轴垂直于表面排列.

(2) 胆甾-向列相液晶结构.

胆甾-向列相液晶首先在胆甾烯基脂中被看到，它是由一些具有旋光性的有机化合物组成的. 这些有机化合物的分子是手征性的，若在向列型液晶中加入少量的手征性分子也可形成胆甾-向列相液晶. 它的结构如图5.24.2所示，其中的分子排列是这样的：在每一层中分子都有单一排列方向；分子的长轴平行于层的平面，在同一层内分子的长轴取向趋于平行，而相邻的两层中分子长轴的取向稍有偏转，这样一层层地叠加起来形成螺旋结构. 垂直于层面的直线称为螺旋轴. 根据化合物性质的不同，螺旋可以是右手性的或者是左手性的.

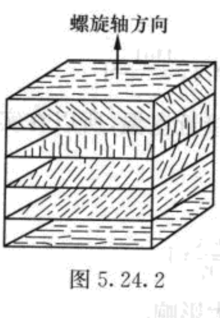


图5.24.2

可以用机械扭曲普通向列相而得到胆甾-向列相结构，这可以通过按同一方向摩擦两个玻璃表面，然后使摩擦方向垂直组成一个液晶盒，注入向列相液晶. 这样的液晶盒可以使透过的偏振光旋转90°角.

2) 层状液晶

层状液晶以其发现的次序以 A、B、C…命名. 其结构总的特征是分子排列成片层状，而每一层中的分子排列又分为有序和无序两大类. 片层的厚度约等于自由分子的长度. 层间的吸引力与分子之间侧面的吸引力相比是弱的，因而各层之间十分容易滑移. 层状液晶比丝状液晶更为黏滞，有序程度也较丝状液晶高.

2. 热致液晶相变和多形性

热致液晶在逐步加热过程中的相变顺序为

$$\text{结晶体(C)}\ T_m \cdot \underset{\text{(熔点温度)}}{\text{液晶(LC)}}\ T_C \cdot \underset{\text{(清亮点温度)}}{\text{各向同性液体(I)}}\ T℃$$

通常称 $\Delta T_{LC}=|T_C-T_m|$ 为液晶相存在的温度范围，ΔT_{LC} 一般为一至几十摄氏度.

一些热致液晶受热从固体过渡到各向同性液体时，不仅出现一种液晶形态，还出现多种液晶形态，称之为多形性. 向列型液晶和胆甾型液晶不能在同种物质中出现，这是因为胆甾型液晶是由手征性分子组成的(或含有手征性分子)，而向列型液晶物质是非手征性分子化合物.

对于多形性的液晶材料，在加热过程中，多个液晶相出现的顺序是从有序程度较高的相逐渐过渡到有序程度较低的相，直到无序的各向同性液体. 若一种材料加热过程中出现层状和丝状两种液晶形态，则它们的相变顺序应是：晶体(C)→层状(S)→丝状(N)→各向同性液体(I).

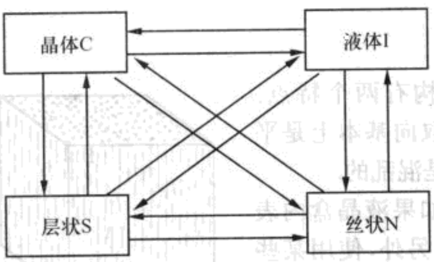
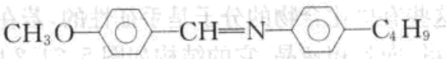


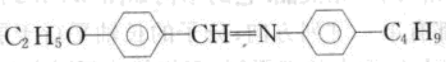
图 5.24.3

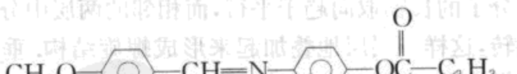
图 5.24.3 是一个包含有层状和丝状液晶材料相变中可能发生的过程(其中层状液晶没有细分类别).

热致液晶相变实例：

(1) 单一相液晶

MBBA 　$C \underset{(T_m)}{\overset{21℃}{\rightleftharpoons}} N \underset{(T_C)}{\overset{45℃}{\rightleftharpoons}} I$

EBBA 　$C \overset{36℃}{\rightleftharpoons} N \overset{80℃}{\rightleftharpoons} I$

APAPA 　$C \overset{83℃}{\rightleftharpoons} N \overset{110℃}{\rightleftharpoons} I$

上面三个实例都是单一相的向列液晶，前两种因为相变温度低，接近室温，所以在实际中应用较广.

(2) 多形性液晶：胆甾烯壬酸酯

$$[CH_2(CH_2)_7CO_2C_{27}H_{45}]C \underset{T_m}{\overset{78℃}{\rightleftharpoons}} S \overset{79℃}{\rightleftharpoons} CH(\text{胆甾型}) \underset{T_C}{\overset{90℃}{\rightleftharpoons}} I$$

这是本实验所用的液晶材料. 注意：样品的纯度对相变点的温度有较大影响.

3. 液晶的光学性质

结合实验我们仅讨论液晶的双折射效应. 这要从液晶的结构、液晶分子和光波的相互作用谈起.

我们首先设想一种简单的情况,即分子由一对原子组成,并与其他分子相隔较远,如图 5.24.4 所示. 单个原子在光波作用下,原子中的电子系统将相对原子核发生位移,而生成光场电偶极子,称为原子极化. 电偶极子的极性将随着光波的振动频率连续地反转,其电偶极矩为

$$p = ql$$

式中,q 为偶极子的正电荷量,l 为正负电荷的距离.

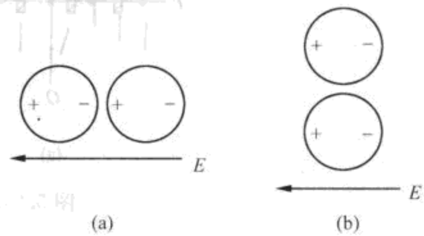


图 5.24.4　在光场中原子对的两种特殊位置的极化情况

双原子在光波作用下,其电偶极子的强度不仅与光场有关,也与两个偶极子相感生电偶极子强度有关. 如图 5.24.4(a)所示的情况,光波电矢量 E 在两个原子中心连线方向. 若两个电偶极子的中心距离为 r,那么其中一个电偶极子将在另一个电偶极子中心处附加一个电场(即电偶极子场强),其值为 $E_r = 2p/r^3$,方向与电矢量 E 相同. 显然,在这种情况下,原子的电偶极矩比只有一个原子单独存在时的电偶极矩还要大些. 当两个原子处在如图 5.24.4(b)所示的情况下,即电矢量垂直于两个原子中心连线时,一个电偶极子对另一个电偶极子产生的附加场强 $E_r' = p/r^3$,方向与电矢量相反,因而,在此情况下,原子的电偶极矩比一个原子单独存在时的电偶极矩还要小些. 这种方向效应随着原子距离的增加迅速下降(与距离三次方成反比). 在分子排列结构中,属于两个分子的原子,它们是以范特瓦尔的距离分开的. 这个距离要比在同一个分子中化学键连接的原子的距离更大. 我们可以把属于两个分子的原子的距离当作远离情况,作为一级近似忽略这种方向效应.

以上的讨论可以推广到更大、更复杂的分子. 例如,棒状液晶分子,当光波的电矢量平行于分子长轴时所产生的电偶极矩的平均值为最大,而垂直于分子长轴时为最小. 由这种分子组成的媒质,在一定的密度下,对光的折射率随着极化程度的增加而增加,因而,在平面偏振光的作用下,不同的方向有不同的折射率,所以这种媒质呈双折射效应.

由棒状分子构成的丝状液晶,如分子长轴的平均取向为 OO',入射光沿 PP' 方向传播,光波的电矢量垂直于传播方向 PP',并可分解为平行于 OO' 和垂直于 OO' 两个方向上的振动,它们分别用短划和点来代表,如图 5.24.5(a)所示. 从上面的讨论可知,电矢量平行于分子长轴的光有最大折射率 n_{max},而垂直于分子长轴的光有最小折射率 n_{min},其光率体(即折射率椭球)如图 5.24.5(b)所示,光轴方向和分子长轴平行一致.

为了便于在偏光显微镜下观察研究,通常把液晶密封在两块玻璃板之间,做成"液晶盒".

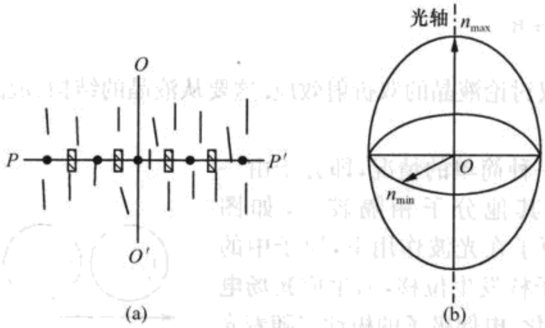


图 5.24.5　丝状液晶及其光率体

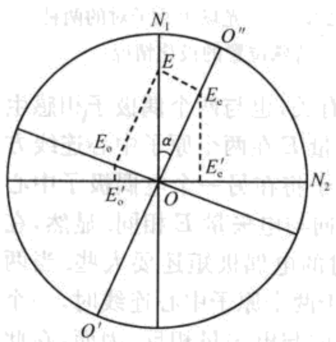


图 5.24.6

1) 液晶盒在正交(或平行)偏光镜间的干涉色

若 $N_1 \perp N_2$，液晶的光轴 $O'O''$ 平行于液晶盒表面，且与起偏镜的通光方向 N_1 成 α 角(图 5.24.6)．振幅为 E 的平行平面偏振光通过液晶后分成 o 光和 e 光，其振幅为

$$E_e = E\cos\alpha$$
$$E_o = E\sin\alpha$$

o 光和 e 光再经检偏器，其通光方向为 N_2 后，其振幅为 E'_e 和 E'_o，则

$$E'_e = E\cos\alpha \cdot \sin\alpha$$
$$E'_o = E\sin\alpha \cdot \cos\alpha$$

它们的位相差为

$$\delta = \frac{2\pi d}{\lambda}(n_o - n_e) + \pi$$

因此，在正交偏光情况($N_1 \perp N_2$)下，透过厚度为 d 且 o 光和 e 光折射率为 n_o 和 n_e 的液晶薄层后，光的强度 $I_\perp$ 由下式表示(此时忽略了液晶片和偏光镜对光的吸收和反射损失)

$$\begin{aligned} I_\perp &= E'^2_e + E'^2_o + 2E'_e E'_o \cos\delta \\ &= E^2 \sin^2 2\alpha \cdot \sin^2[\pi d(n_o - n_e)/\lambda] \end{aligned} \tag{5.24.1}$$

同理，可推出在平行偏光镜的情况($N_1 /\!/ N_2$)下，插入光轴平行液晶盒表面的液晶片后，透过光的强度 $I_{/\!/}$ 为

$$I_{/\!/} = E^2 - E^2 \sin^2 2\alpha \cdot \sin^2\left[\frac{\pi d(n_o - n_e)}{\lambda}\right] \tag{5.24.2}$$

由(5.24.1)式可以看出，在下面三种情况下，通过检偏器的光强为零：

(1) 当 $\alpha = 0°, 90°, 180°, 270°$ 时，由起偏器产生的平面偏振光进入液晶后不产生双折射，其光振动方向 OE 仍垂直于 N_2，它将被检偏器"吸收"，使 $I=0$ 而消光．

(2) 当 $n_o - n_e = 0$ 时，液晶此时处于各向同性状态(或液晶的光轴垂直于液晶盒表面的情况)．

(3) 假如使用单色光，其波长为 λ，当 $d(n_o - n_e) = k\lambda (k=1,2,3,\cdots)$ 时，通过检偏器的

E_o'和E_e'光波彼此相干而使$I=0$.

用白光照射时,不同波长对应于不同的光程差,凡满足$d(n_o-n_e)=k\lambda$的光完全消失,而余下的其他波长的光叠加起来则呈现出特定的颜色,这种颜色称为干涉色.各级干涉色都按明显的顺序排列,且级次越高颜色越淡,五级以上形成白色.各级干涉色的颜色特征,是测定光程差的重要依据.显色偏振是检查物质是否具有双折射现象极灵敏的方法.

2) 在会聚偏振光下液晶盒所形成的光学现象

在正交偏光镜间,若增加一会聚透镜(拉索透镜)就可使由起偏器产生的平行偏振光成为会聚的偏振光,即有很多入射方向互不相同的光入射到液晶盒.用不同方法制作的液晶盒,在会聚偏振光下所形成的干涉图样各不相同,据此可以了解丝状液晶棒状分子长轴的取向(即其排列方式).

(1) 光轴垂直于液晶盒表面的情况.

① 偏振光入射P和P'点(图5.24.7).此时入射在液晶上的光为e光,此光的振动方向垂直于N_2,不能通过N_2.故凡入射点在N_1上的光都不能通过N_2.

② 偏振光入射在H和H'点时,入射在液晶上的光为o光,此光的振动方向垂直于N_2,不能通过N_2.

故在以上两种情况下,获得平行N_1和N_2的黑十字线.

③ 入射点在A点的情况

入射光E通过液晶盒分解为o光(振幅为E_o)和e光(振幅为E_e),再通过N_2的光是E_o'和E_e'干涉的结果.其光强仍可用下式表达

$$I=E^2\sin^2 2\alpha\cdot\sin^2\frac{\pi d'(n_o-n_e)}{\lambda}$$

式中,α为该液晶的主截面与N_1的夹角,d'为光在液晶内走过的路程.由图5.24.8可知

$$d'=\frac{d}{\cos i_2}\tag{5.24.3}$$

所以

$$I=E^2\sin^2 2\alpha\cdot\sin^2\frac{\pi d(n_o-n_e)}{\lambda\cos i_2}\tag{5.24.4}$$

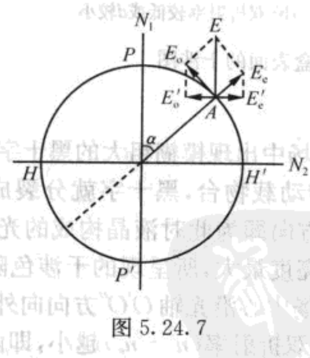


图5.24.7

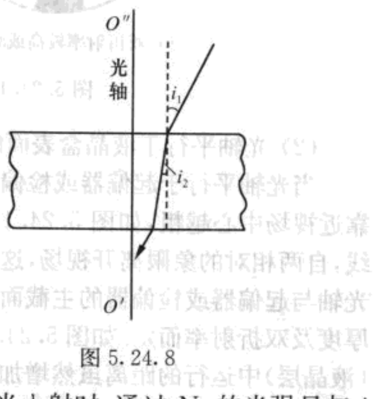


图5.24.8

对于给定的液晶盒,d和n_o-n_e是一确定值.故在单色光入射时,通过N_2的光强只与i_2

有关. 凡 i_2 相同的点，其强度相同，此时将看到一组同心的明暗相间的圆环. 在白光入射时，不同的波长同一级环所对应的 i_2 角不同，此时将显现出一组彩色圆环(亦称等色线). 图 5.24.9 为光轴干涉图产生的图解.

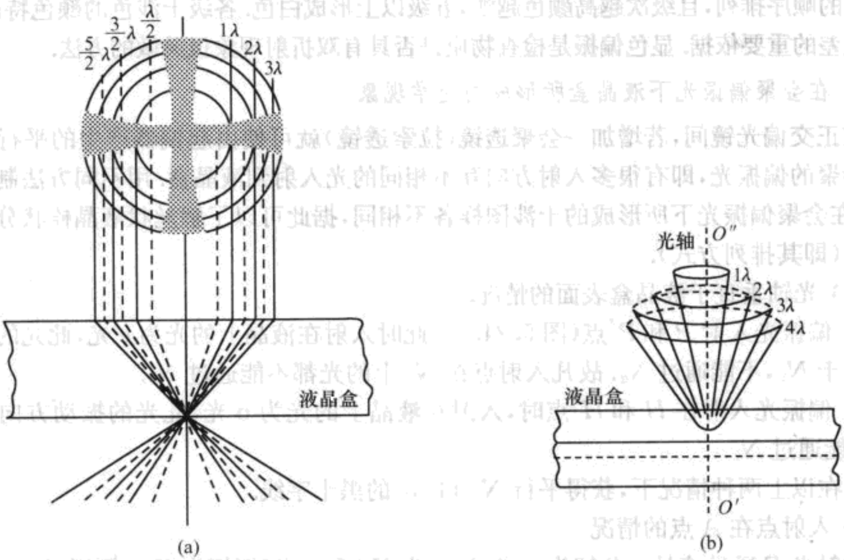
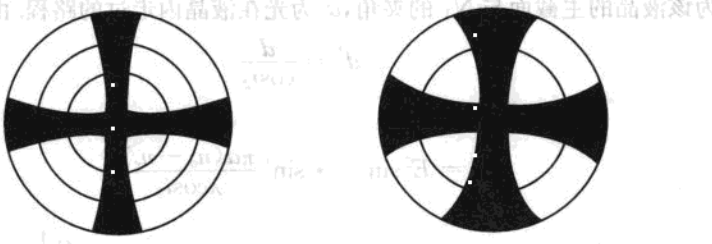


图 5.24.9　光轴干涉图产生的图解

若液晶盒较厚，干涉环较密集，如图 5.24.10(a)所示；若液晶盒较薄，或双折射率较低时，则图样仅是一粗大黑十字带或干涉环稀疏，如图 5.24.10(b)所示.



(a) 双折射率较高或d较大　　(b) 双折射率较低或d较小

图 5.24.10　光轴垂直于液晶盒表面的干涉图

(2) 光轴平行于液晶盒表面的情况.

当光轴平行于起偏器或检偏器的主截面时，视场中出现模糊粗大的黑十字，该十字越靠近视场中心越粗，如图 5.24.11(a)所示. 少许转动载物台，黑十字就分裂成一对双曲线，自两相对的象限离开视场，这时双曲线主轴的方向即为此时液晶构成的光轴方向. 当光轴与起偏器或检偏器的主截面成 45°角时，视场亮度最大，所呈现的干涉色随液晶层的厚度及双折射率而定. 如图 5.24.11(b)所示，由视场中心沿光轴 $O'O''$方向向外，光在薄片(液晶层)中运行的距离虽然增加了，然而越向边缘双折射率(n_o-n_e)越小，即两波速度越来越小，其给予光程差的影响超过了因厚度增加所给予光程差的影响，所以总的效果是逐

渐向外，光程差逐渐降低，干涉色级序逐渐降低. 而在垂直于光轴方向，光人射到液晶层上均与光轴垂直，因此双折射率是同值，二波速度之差是恒定的，光程差主要决定于厚度，故随着不同倾角的人射光穿过液晶盒的厚度不同，光程差也不同，表现在干涉图上，在垂直光轴的两象限中，由视场中心向边缘，干涉色的级序越来越高.





图 5.24.11 光轴平行于液晶盒表面的干涉图

3) 液晶的光性符号判定

测定光性符号的各种方法都是根据光程差的补偿原理来进行的，实际上是确定在液晶中 o 光和 e 光的速度哪个大的问题.

对于双折射率较低的液晶可用补色片(如石膏试板)来判定(本实验不采用).

对于折射率较高或厚度较大的液晶可用石英补偿片(石英劈)来判定. 对于光轴垂直于表面的液晶盒，采用白光或单色光可得到如图 5.24.10 所示的等色曲线. 若石英劈的延长方向(长边)是快光方向，将石英劈从试片孔(Ⅱ-Ⅳ象限方向)慢慢插入时，观察到Ⅱ-Ⅳ象限内等色曲线渐离中心向边缘移动，同时Ⅰ-Ⅲ象限的等色曲线渐向中心移动，则液晶是"正光性"的. 若观察到的情况相反，则液晶是"负光性"的. 有些石英劈延长方向是慢光，其结果恰巧与上述结论相反. 因此用石英劈测定光性符号时，应首先知道它的快慢光方向.

对于光轴平行于表面的液晶盒，采用单色光源(如钠光灯)可得到如图 5.24.11 所示的等色曲线. 插入石英劈(延长方向为快光方向)时，若系正光性，Ⅱ-Ⅳ象限等色曲线移向中心，Ⅰ-Ⅲ象限等色曲线移向视场边缘. 若系负光性，则等色曲线朝相反方向移动.

【仪器介绍】

偏光显微镜、CCD 成像与微机图像采集系统、补偿片、载物台加热器、自动温度控制仪、待测液晶盒等.

偏光显微镜是研究液晶光学特性的重要工具之一. 它与普通生物显微镜的差别，除了上面装有两个偏光元件——起偏镜和检偏镜外，还附有费氏旋转台、补偿片、补色片、波长片等. 它的结构比生物显微镜复杂，精度也较高，因此操作时要细心，动手前必须十分明确它的结构和显微镜的基本操作规程.

偏光显微镜的结构如图 5.24.12 所示.

仪器底座 1 上装有视场光阑 2(或反射镜 2)，照明灯 3 通过变压器接市电并从 1 的后

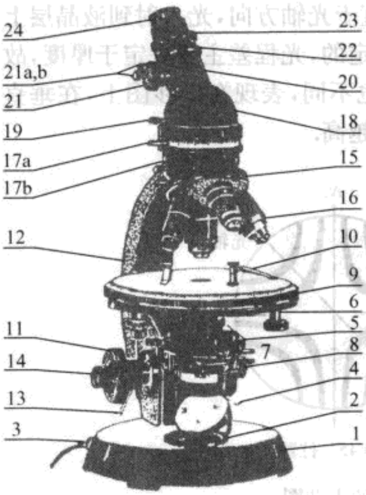


图 5.24.12

部插入.起偏镜 4、聚光器 5 和拉索透镜 6 构成一个整体 7 随手轮 8 上下移动.且 4 可绕仪器轴线转动 90°,转动角值在 4 的外沿面标出.起偏镜 4 还可通过手柄将它移出光路.推动 6 的拨杆可使拉索透镜进入或离开光路.调节 7 的两个螺钉可使照明系统与仪器共轴.载物台 9 能绕仪器轴线转动,转动角值由度盘读出,其上有样品压持器 10.转动大手轮 11 可使镜臂 12 上下移动,称之为“调焦粗调”.用手轮 13 可固定它.转动小手轮 14 可使载物台 9 上下微动(升程格值为 0.02mm),谓之“调焦微调”.物镜转换器 15 上旋入物镜 16,且 15 可绕仪器轴线转动,使不同物镜进入光路.检偏镜 17 可绕仪器轴线转动 180°,转角值可从其外沿面读出;还可通过拉杆 17a 使它进入或离开光路.其下方沿 45°方向(相对于 0°方位)有补偿片、补色片、波长片插入孔 17b.转向棱镜 18 通过固定螺钉 19 固定于仪器上,松开 19,移开 18 及其相连的目镜管 20,可在该部位上装置显微照相设备.20 内装有勃氏镜,其外有手轮 21 相连,转动 21 可使勃氏镜进入或离开光路.21 上的两个小螺钉 21a、b 可调节勃氏镜中心位于光路上.22 为可变光阑,23 为光学管长度调节环,24 为目镜.

补偿片是一个光轴平行切面的长方形劈片.由于劈片厚度不相等,故光程差将随厚度的增加而增加,为了便于判别快光和慢光的振动方向,制片时使劈片的快光振动方向平行于长方形的长边,慢光平行于短边,并用 N_p、N_g 标出.

【实验内容】

1. 偏光显微镜的调整和校正

为了使显微镜能顺利进行工作并保证测量结果精确,在使用偏光显微镜分析样品之前,应对其有关部件进行调整和校正.

1) 调节照明系统与显微镜系统共轴

本实验采用外光源照明,仪器 2 部位装有平面凹面反射镜.通过调节外光源的位置及其光阑;调节反射镜 2 的方位;调节照明系统 7 的两个中心调节螺钉,并通过手轮 8 上下移动照明系统 7,可使视场呈现均匀明亮状态.

2) 物镜中心的调整

使用偏光显微镜,常常要转动载物台使样品处于不同方位来进行观察.这就要求被观察的部分所成的像始终处于显微镜的视场中心,否则转动载物台时,被观察的部位将离开视场中心甚至跑出视场之外.因此,偏光显微镜的物镜一般装有校正中心用的环或螺旋,用它们来调节物镜的光轴,使之通过载物台的转动中心.

调节时,使显微镜观察到样品上一物点,在转动载物台的同时,使用渐近或半近调节法来达到校正物镜中心的目的.

3）确定起偏器的主平面与检偏器的主平面方位

在通常情况下，起偏器与检偏器应安置成这种状态：通过起偏器的光的振动方向应平行于目镜十字分划线的横线（东西方向），此时起偏器的方位值应为 0°；而通过检偏器的光的振动方向应平行于目镜十字分划线的竖线（南北方向），其方位值也应为 0°. 确定方法如下：

(1) 将一块黑云母片置于载物台上，调节显微镜观察到清晰的解理纹；在薄片中找寻一个解理发育好的黑云母晶体，并移至视场中心.

(2) 推开起偏器脱离光路，并使检偏器位于 0°刻度处.

(3) 转动载物台，使黑云母晶体的解理纹平行于十字分划线的竖线. 这时若该晶体呈深棕色，则检偏器的方位正常；否则，需微微转动检偏器测定出方位偏差.

(4) 取出黑云母，装好起偏器，利用检偏器校正起偏器的方位.

2. 单轴液晶（在液晶盒内形成）的光轴取向和光性符号测定

置液晶盒于载物台上，在会聚正交偏光下进行观察，确定各种液晶盒的光轴取向和光性符号；描绘出它们的干涉图样并注明光性符号.

在会聚偏光下进行观察，应具备下列条件：

(1) 推动载物台下的拉索透镜使其进入光路，使得来自起偏镜的光通过它后形成强烈的会聚光. 调节照明系统的升降手轮使光点会聚于样品上.

(2) 为了接纳由拉索透镜产生的光锥，应采用高倍物镜，并使物镜尽量靠近样品. **高倍显微镜工作距离极小，应特别注意操作规程，以免损坏仪器及实验样品.**

(3) 由于加进了拉索透镜，物镜的成像面降低了，为了使物镜所成的像仍处于目镜的焦平面上，还必须转动手轮 21 将勃氏镜引进光路中.

如果看不到干涉图，应首先检查上述条件是否完全满足，然后分析其他原因，如高倍物镜中心是否校正，会聚光锥是否进入物镜中等，并做必要的调节. 有时干涉图看起来比较模糊，可适当地调节光学管长度调节环 23 使图样清晰.

3. 观察和研究液晶的相变过程

本实验采用低倍偏光显微镜在正交偏光下观察液晶的相变过程并测定液晶的相变温度. 操作前应仔细阅读仪器说明书，熟悉 CCD 成像和微机图像采集系统的操作要领，从微机调出本实验的授课录相，观看液晶的相变图像，大致了解相变点处的变化情况.

(1) 将装有液晶样品（或自制液晶盒）的加热器置于载物台上，调节光源位置及反射镜方位，使光线通过加热器中心圆孔并进入物镜中，同时对样品调焦，在视场中观察到清晰的液晶在室温下的结晶图像.

(2) 用控温仪控制加热速率. 为了便于液晶相变观察，应控制加热器升温不能太快，也不能过高，否则将严重损坏显微镜和液晶盒.

(3) 升温过程中，通过液晶图像随温度的变化判断熔点温度和清亮点温度，测出该液晶的相变温度 T_m 和 T_C.

(4) 在降温过程中观察液晶的相变过程，从微机采集的液晶图像中选出几个典型液

晶相的显微织构图打印，并用文字简要说明之.

(5) 分析实验结果的误差来源.

实验 5.25 液晶电光效应及应用

液晶分子是含有极性基团的极性分子，在电场作用下，偶极子会按电场方向取向，导致分子原有的排列方式发生变化，从而液晶的光学性质也随之发生改变，这种因外电场引起的液晶光学性质的改变称为液晶的电光效应.

1888 年，奥地利植物学家 Reinitzer 在做有机物溶解实验时，在一定的温度范围内观察到了液晶. 1961 年美国 RCA 公司的 Heimeir 发现了液晶的一系列电光效应，并制成了显示器件. 从 20 世纪 70 年代开始，日本公司将液晶与集成电路技术结合，制成了一系列的液晶显示器件，并在这一领域保持领先地位. 液晶显示器件由于具有驱动电压低（一般为几伏）、功耗极小、体积小、寿命长、环保无辐射等优点，在各种显示器件的竞争中有独领风骚之势.

【实验目的】

(1) 掌握液晶光开关工作原理，测量液晶光开关的电光特性曲线和时间响应曲线.

(2) 了解液晶光开关的工作条件.

(3) 了解液晶光开关构成图像矩阵的方法，学习和掌握这种矩阵所组成的液晶显示器构成文字和图形的显示模式，从而了解一般液晶显示器件的工作原理.

【实验原理】

1. 液晶光开关的工作原理

液晶可分为热致液晶与溶致液晶. 热致液晶在一定的温度范围内呈现液晶的光学各向异性，溶致液晶是溶质溶于溶剂中形成的液晶. 目前用于显示器件的都是热致液晶，它的特性随温度的改变而发生变化. 下面以常用的 TN（扭曲向列）型液晶为例，说明其工作原理.

TN 型光开关的结构如图 5.25.1 所示. 在两块玻璃板之间夹有正性向列相液晶，液晶分子的形状如同火柴一样，为棍状. 棍的长度为十几埃（1 埃 $=10^{-10}$ 米），直径为 4～6 埃，液晶层厚度一般为 5～8 微米. 玻璃板的内表面涂有透明电极，电极的表面预先作了定向处理（可用软绒布朝一个方向摩擦，也可在电极表面涂取向剂），这样，液晶分子在透明电极表面就会躺倒在摩擦所形成的微沟谷里；电极表面的液晶分子按一定方向排列，且上下电极定向方向相互垂直. 上下电极之间的液晶分子因范德瓦尔斯力的作用，趋向于平行排列. 然而由于上下电极上液晶的定向方向相互垂直，所以从俯视方向看，液晶分子的排列从上电极的沿 $-45°$ 方向排列逐步地、均匀地扭曲到下电极的沿 $+45°$ 方向排列，整个扭曲了 90°，如图 5.25.1 左图所示.

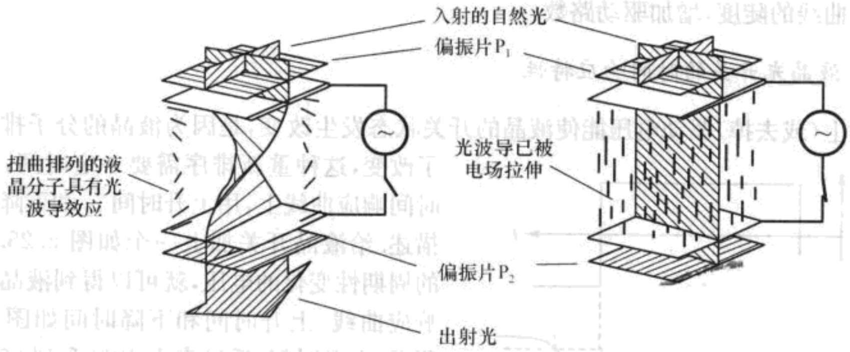


图 5.25.1 液晶光开关工作原理

理论和实验都证明,上述均匀扭曲排列起来的结构具有光波导的性质,即偏振光从上电极表面透过扭曲排列起来的液晶传播到下电极表面时,偏振方向会旋转 90°.

取两张偏振片贴在玻璃的两面,P_1 的透光轴与上电极的定向方向相同,P_2 的透光轴与下电极的定向方向相同,于是 P_1 和 P_2 的透光轴相互正交.

在未加驱动电压的情况下,来自光源的自然光经过偏振片 P_1 后只剩下平行于透光轴的线偏振光,该线偏振光到达输出面时,偏振面旋转了 90°. 这时光的偏振面与 P_2 的透光轴平行,因而有光通过.

在施加足够电压情况下(一般为1~2V),在静电场的作用下,除了基片附近的液晶分子被基片"锚定"以外,其他液晶分子趋于平行于电场方向排列. 于是原来的扭曲结构被破坏,成了均匀结构,如图 5.25.1 右图所示. 从 P_1 透射出来的偏振光的偏振方向在液晶中传播时不再旋转,保持原来的偏振方向到达下电极. 这时光的偏振方向与 P_2 正交,因而光被关断.

由于上述光开关在没有电场的情况下让光透过,加上电场的时候光被关断,因此叫做常通型光开关,又叫做"常白模式". 若 P_1 和 P_2 的透光轴相互平行,则构成"常黑模式".

2. 液晶光开关的电光特性

图 5.25.2 为光线垂直液晶面入射时本实验所用液晶相对透射率(以不加电场时的透射率为100%)与外加电压的关系.

如图 5.25.2 所示,对于常白模式的液晶,其透射率随外加电压的升高而逐渐降低,在一定电压下达到最低点,此后略有变化. 可以根据此电光特性曲线图得出液晶的阈值电压和关断电压.

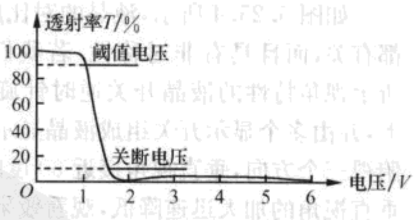


图 5.25.2 液晶光开关的电光特性

阈值电压是透过率为 90%时的驱动电压;关断电压是透过率为 10%时的驱动电压.

液晶的电光特性曲线越陡,即阈值电压与关断电压的差值越小,由液晶开关单元构成的显示器件允许的驱动路数就越多. TN 型液晶最多允许 16 路驱动,故常用于数码显示. 在电脑、电视等需要高分辨率的显示器件中,常采用 STN(超扭曲向列)型液晶,以改善电

光特性曲线的陡度，增加驱动路数.

3. 液晶光开关的时间响应特性

加上(或去掉)驱动电压能使液晶的开关状态发生改变，是因为液晶的分子排序发生了改变，这种重新排序需要一定时间，反映在时间响应曲线上，用上升时间 τ_r 和下降时间 τ_d 描述. 给液晶开关加上一个如图 5.25.3 所示的周期性变化的电压，就可以得到液晶的时间响应曲线. 上升时间和下降时间如图 5.25.3 所示，上升时间：透过率由 10%升到 90%所需时间；下降时间：透过率由 90%降到 10%所需时间. 液晶的响应时间越短，显示动态图像的效果越好，这是液晶显示器的重要指标. 早期的液晶显示器在这方面逊色于其他显示器，现在通过结构方面的改进，已获得很好的效果.

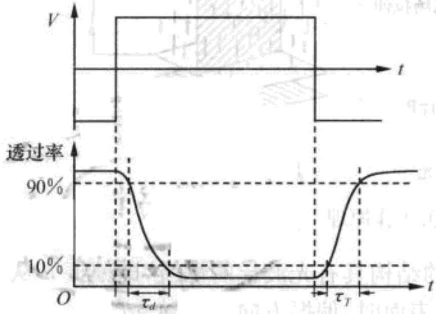


图 5.25.3　液晶光开关的时间响应特性

4. 液晶光开关的视角特性

液晶光开关的视角特性表示对比度与视角的关系. 对比度定义为光开关打开和关断时透射光强度之比，对比度大于 5 时，可以获得满意的图像，对比度小于 2，图像就模糊不清了.

图 5.25.4 为某种液晶视角特性的理论计算结果. 图中，用与原点的距离表示垂直视角(入射光线方向与液晶屏法线方向的夹角)的大小，三个同心圆分别表示垂直视角为 30、60 和 90 度. 90 度同心圆外面标注的数字表示水平视角(入射光线在液晶屏上的投影与 0 度方向之间的夹角)的大小. 图 5.25.4 中的闭合曲线为不同对比度时的等对比度曲线.

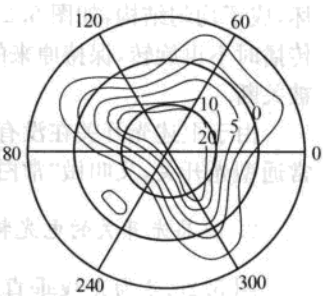


图 5.25.4　液晶的视角特性

如图 5.25.4 所示，液晶的对比度与垂直和水平视角都有关，而且具有非对称性. 若我们把具有如图 5.25.4 所示视角特性的液晶开关逆时针旋转，以 220 度方向向下，并由多个显示开关组成液晶显示屏，则该液晶显示屏的左右视角特性对称，在左、右和俯视三个方向，垂直视角接近 60 度时对比度为 5，观看效果较好. 在仰视方向对比度随着垂直视角的加大迅速降低，观看效果差.

5. 液晶光开关构成图像显示矩阵的方法

除了液晶显示器外，其他显示器靠自身发光来实现信息显示功能. 这些显示器主要有阴极射线管显示(CRT)，等离子体显示(PDP)，电致发光显示(ELD)，发光二极管(LED)显示，有机发光二极管(OLED)显示，真空荧光管显示(VFD)，场发射显示

(FED). 这些显示器因为要发光,所以要消耗大量的能量.

液晶显示器通过对外界光线的开关控制来完成信息显示任务,为非主动发光型显示,其最大的优点在于能耗极低. 因此,液晶显示器在便携式装置的显示方面,如电子表、万用表、手机、传呼机等具有不可替代的地位. 下面我们来看看如何利用液晶光开关来实现图形和图像显示任务.

矩阵显示方式,把如图 5.25.5 (a) 所示的横条形状的透明电极做在一块玻璃片上,叫做行驱动电极,简称行电极(常用 X_i 表示),而把竖条形状的电极制在另一块玻璃片上,叫做列驱动电极,简称列电极(常用 S_i 表示). 把这两块玻璃片面对面组合起来,把液晶灌注在这两片玻璃之间构成液晶盒. 为了画面简洁,通常将横条形状和竖条形状的 ITO 电极抽象为横线和竖线,分别代表扫描电极和信号电极,如图 5.25.5 (b) 所示.

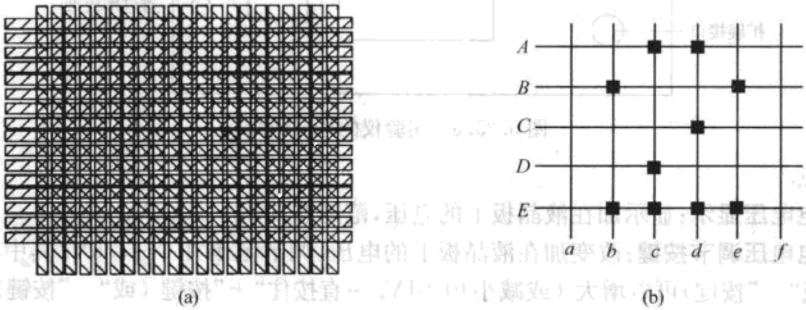


图 5.25.5　液晶光开关组成的矩阵式图形显示器

矩阵型显示器的工作方式为扫描方式,其显示原理简要说明如下:

欲显示如图 5.25.5(b)所示的那些有方块的像素,首先在第 A 行加上高电平,其余行加上低电平,同时在列电极的对应电极 c、d 上加上低电平,于是 A 行的那些带有方块的像素就被显示出来了;然后第 B 行加上高电平,其余行加上低电平,同时在列电极的对应电极 b、e 上加上低电平,因而 B 行的那些带有方块的像素被显示出来了;然后是第 C 行、第 D 行……,以此类推,最后显示出一整场的图像. 这种工作方式称为扫描方式.

这种分时间扫描每一行的方式是平板显示器的共同的寻址方式,依这种方式,可以让每一个液晶光开关按照其上的电压的幅值让外界光关断或通过,从而显示出任意文字、图形和图像.

【仪器介绍】

液晶光开关电光特性综合实验仪的外部结构如图 5.25.6 所示. 下面简单介绍仪器各部分的功能.

模式转换开关:切换液晶的静态和动态(图像显示)两种工作模式. 在静态时,所有的液晶单元所加电压相同,在(动态)图像显示时,每个单元所加的电压由开关矩阵控制. 同时,当开关处于静态时打开激光发射器,当开关处于动态时关闭激光发射器.

静态闪烁/动态清屏切换开关:当仪器工作在静态的时候,此开关可以切换到闪烁和静止两种方式;当仪器工作在动态的时候,此开关可以清除液晶屏幕因按动开关矩阵而产

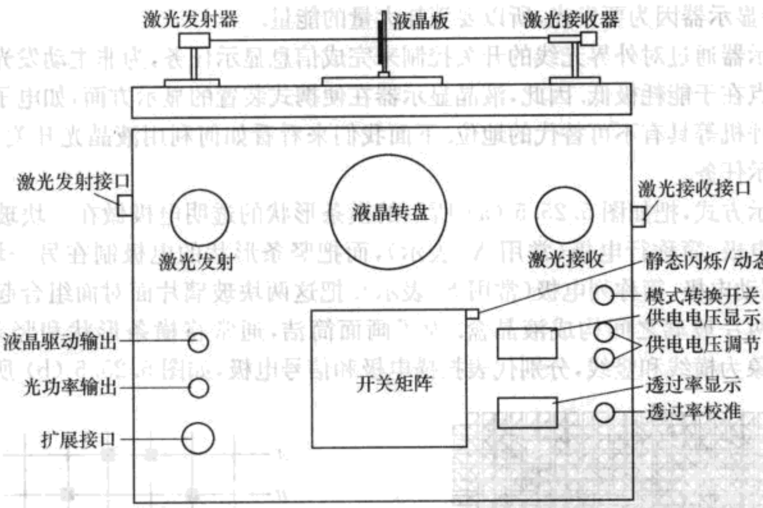


图 5.25.6　实验仪的外部结构

生的斑点.

供电电压显示:显示加在液晶板上的电压,范围在 0.00～7.60V.

供电电压调节按键:改变加在液晶板上的电压,调节范围在 0～7.6V.其中单击"+"按键(或"−"按键)可以增大(或减小)0.01V.一直按住"+"按键(或"−"按键)2 秒以上可以快速增大(或减小)供电电压,但当电压大于或小于一定范围时需要单击按键才可以改变电压.

透过率显示:显示光透过液晶板后光强的相对百分比.

透过率校准按键:在激光接收端处于最大接收的时候(即供电电压为 0V 时),如果显示值大于"250",则按住该键 3 秒可以将透过率校准为 100%;如果供电电压不为 0,或显示小于"250",则该按键无效,不能校准透过率.

液晶驱动输出:接存储示波器,显示液晶的驱动电压.

光功率输出:接存储示波器,显示液晶的时间响应曲线,可以根据此曲线来得到液晶响应时间的上升时间和下降时间.

扩展接口:连接 LCDEO 信号适配器的接口,通过信号适配器可以使用普通示波器观测液晶光开关特性的响应时间曲线.

激光发射器:为仪器提供较强的光源.

液晶板:本实验仪器的测量样品.

激光接收器:将透过液晶板的激光转换为电压输入到透过率显示表;

开关矩阵:此为 16×16 的按键矩阵,用于液晶的显示功能实验;

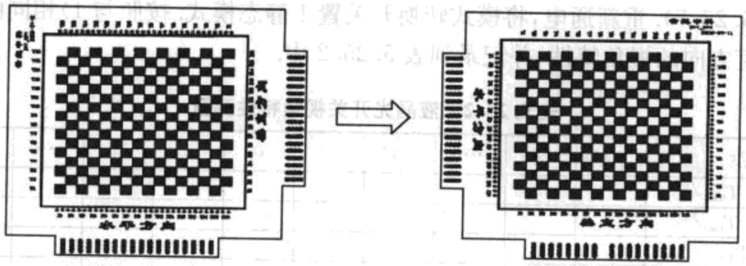
液晶转盘:承载液晶板与其一起转动,用于液晶的视角特性实验;

电源开关:仪器的总电源开关.

【实验内容】

实验前:将液晶板(金手指 1)(图 5.25.7)插入转盘上的插槽,液晶凸起面必须正对激

光发射方向. 打开电源开关,点亮激光器,使激光器预热 10~20min. 在正式进行实验前,首先需要检查仪器的初始状态,看激光是否垂直入射到接收器;在静态 0V 条件下,透过率显示是否为“100%”. 如果显示正确,则可以开始实验;如果不正确,则应将仪器调整好再进行实验.



水平方向(金手指1)　　　　垂直方向(金手指2)

图 5.25.7　液晶板方向(视角为正视液晶屏凸起面)

1. 液晶光开关电光特性测量

将模式转换开关置于静态模式,将透过率显示校准为 100%,按表 5.25.1 的数据改变电压,使得电压值从 0V 到 6V 变化,记录相应电压下的透射率数值. 重复 3 次并计算相应电压下透射率的平均值,依据实验数据绘制电光特性曲线,可以得出阈值电压和关断电压.

表 5.25.1　液晶光开关电光特性测量

电压/V		0	0.5	0.8	1.0	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
透射率/%	1															
	2															
	3															
	平均															

2. 液晶的时间响应的测量

将模式转换开关置于静态模式,透过率显示调到 100,然后将液晶供电电压调到 2.00V,在液晶静态闪烁状态下,用存储示波器观察光开关时间响应特性曲线,可以根据此曲线得到液晶的上升时间 τ_r 和下降时间 τ_d.

3. 液晶光开关视角特性的测量

1) 水平方向视角特性的测量

将模式转换开关置于静态模式. 首先将透过率显示调到 100%,然后再进行实验.

确定当前液晶板为金手指 1 插入的插槽 (图 5.25.7). 在供电电压为 0V 时,按照表 5.25.2 所列举的角度调节液晶屏与入射激光的关系,在每一角度下测量光强透过率最大值 T_{max}. 然后将供电电压置于 2V,再次调节液晶屏角度,测量光强透过率最小值 T_{min},并

计算其对比度. 以角度为横坐标,对比度为纵坐标,绘制水平方向对比度随入射光角度而变化的曲线.

2) 垂直方向视角特性的测量

关断总电源后,取下液晶显示屏,将液晶板旋转 90 度,将金手指 2(垂直方向)插入转盘插槽(图 5.25.7). 重新通电,将模式转换开关置于静态模式. 按照与 1)相同的方法和步骤,测量垂直方向的视角特性,并记录到表 5.25.2 中.

表 5.25.2 液晶光开关视角特性测量

角度/度		−85	−80	……	−10	−5	0	5	10	……	80	85
水平方向视角特性	T_{max}/%											
	T_{min}/%											
	T_{max}/T_{min}											
垂直方向视角特性	T_{max}/%											
	T_{min}/%											
	T_{max}/T_{min}											

4. 液晶显示器显示原理

将模式转换开关置于动态(图像显示)模式. 液晶供电电压调到 5V 左右. 此时矩阵开关板上的每个按键位置对应一个液晶光开关象素. 初始时各相素都处于开通状态,按 1 次矩阵开光板上的某一按键,可改变相应液晶像素的通断状态,所以可以利用点阵输入关断(或点亮)对应的像素,使暗像素(或点亮像素)组合成一个字符或文字. 以此体会液晶显示器件组成图像和文字的工作原理. 矩阵开关板右上角的按键为清屏键,用以清除已输入在显示屏上的图形. 实验完成后,关闭电源开关,取下液晶板妥善保存.

【注意事项】

(1) 绝对禁止用激光束照射他人眼睛或直视光束,以防伤害眼睛!

(2) 在进行液晶视角特性实验中,更换液晶板方向时,**务必关断总电源后,再进行插取**,否则将会损坏液晶板.

(3) 液晶板凸起面必须朝向激光发射方向,否则记录的为错误数据!

(4) 在调节透过率 100%时,如果透过率显示不稳定,则很有可能是光路没有对准,或者激光发射器偏振没有调节好,需要仔细检查,调节好光路.

(5) 在校准透过率 100%前,必须将液晶供电电压显示调到 0.00V 或显示大于“250”,否则无法校准透过率为 100%. 在实验中,电压为 0.00V 时,不要长时间按住“透过率校准”按钮,否则透过率显示将进入非工作状态,本组测试的数据为错误数据,需要重新进行本组实验数据记录.

第 6 章　设计性实验

6.0　设计性实验概述

6.0.1　设计性实验的性质和任务

设计性实验是在学生有一定的基础实验训练后，对学生进行的介于教学实验与实际科学实验之间的、具有对科学实验全过程进行初步训练特点的教学实验. 它的目的在于为学生营造一个自主学习、自行设计和自由发挥的研究性训练氛围，尽可能地开发学生的潜能，强化培养学生的创新意识和提高学生的研究实践能力. 这类实验课题一般由实验室提出，其内容具有综合性、典型性、探索性和可行性，要求学生根据题目的要求，自行查阅资料，确定实验方案和测量方法，选择测量仪器和测量条件，拟定实验步骤，进行实验，最后写出合格的报告.

设计性实验的核心是设计和选择实验方案，并在实验中检验方案的正确性与合理性. 设计时一般包括：根据研究课题的要求确定实验种类及应用理论；根据实验精度的要求及提供的主要仪器，选择实验方案和测量方法，选择测量条件与配套仪器以及测量数据的合理处理等.

在进行设计实验操作的过程中，应考虑各种系统误差产生的可能性. 根据其可能产生的原因，找出如何从测量数据中发现系统误差存在的方法，并估算其大小，制定出如何消除或减小系统误差影响的方案.

6.0.2　设计性实验的实施程序

一个设计性实验如同一个研究小课题，其教学实施程序一般包括：

1. 确定课题

教师提前将设计性实验题目布置给学生自选，或由学生自己提出研究课题.

2. 进行课题前的准备工作，写出课题准备报告

课题准备报告主要内容包括：课题任务、实验方案（原理、方法），实验仪器（名称、型号），实验步骤等.

3. 课题实验

课题实验开始前，教师对每个学生的实验方案逐一检查. 实验方案通过者，可领取仪器进行实验. 方案未通过者，根据提示和建议修改实验方案，征得教师同意，也可进行实验

并不断改进原有方案中不合理的内容，直至完善实验. 实验过程中提倡自主研究式学习，学会自己发现、分析、解决实验中出现的问题.

4. 课题报告

课题报告的基本格式可以仿照科技论文的格式，包括以下内容：

课题名称 （题目、附研究者班级、姓名）

摘要 （简要说明课题研究主题）

关键词 （与研究内容相关的几个主要词汇）

引言 阐述课题研究产生的背景或说明该课题实验的预期目标.

正文 ①研究过程：包括方法原理，选用仪器，实施步骤. ②测量数据及处理、图表分析等. ③分析总结：综合评价本课题的成果，得出相关研究结论.

参考文献 参考书目名称、作者、出版单位、日期.

6.0.3 设计性实验的设计指导

实验方案如何确定，很难概括与总结出一套普遍适用的方法. 下面通过一些实例，比较原则性地介绍有关制定实验方案所必须具备的基本知识，以启迪实验者的探索精神.

1. 实验方法的选择

根据课题所要研究的目的，查阅有关资料，收集各种实验方法，即根据一定的物理原理，确立在被测量与可测量之间建立关系的各种可能形式. 然后分析各种方法的适用条件，比较各种方法的局限性与可能达到的实验精确度等因素，并考虑方案实施的可能性，最后选出最佳的实验方法.

例 1 测量电阻的常用方法及测量范围，如下表所示.

实验方法	欧姆表	伏安法	单电桥	电位差计
测量范围/Ω	$10^{-2}\sim10^{6}$	$10^{-3}\sim10^{6}$	$10\sim10^{6}$	$10^{-2}\sim10^{6}$
误差范围/%	5～0.5	1～0.2	1～0.01	0.1～0.005

例 2 实验要求测量一个电源的输出电压，使测量结果的相对不确定度为 0.05%. 可选用的仪器有：电压表（0.5 级）、电压表（2.5 级）、电位差计（0.1 级）、标准可变电源（0.01%）.

按给定条件，至少可以设计三种方法进行测试：

(1) 用电压表直接测量待测电压源的电压，即所谓直接比较法. 但在给定的两个电压表中，最高精确度 0.5%，故该方法不能达到实验所要求的测量精度.

(2) 用电位差计直接测量待测电压源的输出电压，即利用补偿法. 同样由于电位差计达不到测量精度不宜采用.

(3) 将待测电压与标准电压正极和正极相接，调节标准电源电压，当其输出电压 U_S 与被测电压 U_x 非常接近时，它们有一个非常微小的电压差 δU，用一般的小量程电压表对 δU 进行测量. 差值 δU 越小，测量差值的误差带给结果的影响越小.

利用该方法只要求微差指示器(电压表)的误差不超过4.9%(这是一般电压表均可达到的),就可以使最终的测量误差达到0.05%的水平.即便用2.5级电压表采用第二种微差法也是最佳实验方法.

2. 测量方法的选择

对于某种实验方法,有时可能有几种不同的测量方法可供选择.此时应分析哪一种测量方法测量精度高,引入的系统误差小.因此,选择测量方法的前提是:对测量不确定度的来源及影响进行合理的分析.

例3 在用单摆测重力加速度实验中,摆长约1m,用分度值为1mm的米尺测量;周期约2s,用秒表测量,如果只测一次,由于启动秒表人的感官引起的反应不一致而造成周期的测量误差可达0.3s,则重力加速度的相对不确定度为

$$\frac{U_g}{g}=\frac{U_l}{l}+\frac{2U_T}{T}=\frac{0.1}{100.0}+\frac{2\times 0.3}{2}=30\%$$

如果改成连续测100个周期,则周期的不确定度为0.003s,则重力加速度的相对不确定度只有0.4%.

例4 伏安法测电阻有电流表内接和外接两种电路,当满足 $R_x<\sqrt{R_A\cdot R_V}$(R_A 为电流表内阻,R_V 为电压表内阻)时应选择电流表外接电路;当满足 $R_x>\sqrt{R_A\cdot R_V}$ 时,应选择电流表内接电路.这样可以减少方法误差对测量结果的影响,也可以采用补偿法测电压的方法来消除电流表内阻的影响.

3. 测量仪器的选择

测量仪器的选择包括仪器的类型、仪器的精度(分度值或准确度等级)和测量范围(量程)等方面.要从被测对象的特性、仪器的特性、测量环境、操作技术水平、经济条件、设备及人身安全等因素全面考虑.选择原则是选用合适的仪器以达到指定的测量精度,并不要以为测量仪器精确度越高越好.如果不适当的选择了精度过高的仪器,会给测量带来不必要的麻烦.其原因是仪器精度越高,使用前的调整工作时间越长,还有仪器精度越高,其成本越贵,且使用不当会导致损坏.

另外,在选择仪器时,要求所选用的测量仪器要配套.所谓配套,就是指在同一个实验中所有物理量的测量的相对误差应该"等量分配",不应该产生某一个物理量测量的相对误差特别小而另一个物理量测量的相对误差又特别大的情况.正确的选择原则应该使同一个实验中对所有物理量的测量项的相对误差基本相等.

当间接测量量由几个直接测量量确定时,一般先用不确定度的等分原则,然后根据仪器情况做适当调整.如果受仪器结构限制不能达到时还可以采用合适的数据处理方法.

例5 测某圆柱体的密度,要求 $\Delta\rho/\rho<1.0\%$,待测量的估计值为 $h\approx 3\text{cm}$,$d\approx 1.5\text{cm}$,$m\approx 4.5\text{g}$.

按误差等分配原则有

$$\frac{\Delta m}{m}=\frac{\Delta h}{h}=\frac{2\Delta d}{d}=\frac{1}{3}\times 1.0\%$$

因此，选用分度值为 0.1g 的物理天平测质量，用分度值为 0.02mm 的游标卡尺测直径，用分度值为 0.1mm 的游标卡尺测高度，则可达到要求.

4. 测量条件的选择

在确定实验仪器之后，还需要按照"使测量的不确定度最小的原则"选择测量条件. 确定最有利的测量条件，即确定在什么条件下进行测量引起的结果的误差最小. 从理论上讲，可由误差函数对自变量(被测量)求偏导，并令其一阶偏导数为零而得到. 对于只有一个被测量的函数，可将一阶导数为零的结果带入二阶导数式，若其结果大于零，则该一阶导数的结果即为最有利的条件. 一般分析时多从相对不确定度入手.

5. 数据处理方法的选择

在考虑实验方法时，经常还需要利用数据处理的一些技巧，来解决某些不能或不易被直接测量的物理量的测量问题.

例 6 用简谐振动的方法测量弹簧振子的弹性系数 k.

已知弹簧振子的振动周期与弹性系数 k 及弹簧振子的等效质量 m 间的关系为

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \tag{6.0.1}$$

式中

$$m = m_0 + m_S \tag{6.0.2}$$

式中，m_0 为振动物体的质量，m_S 为弹簧的等效质量. 由于 m_S 是不易确定的，因此 m 也就无法确定. 这样由(6.0.2)式直接求 k 就很困难. 若将(6.0.2)式改写为

$$T^2 = 4\pi^2\frac{m_0 + m_S}{k} \tag{6.0.3}$$

则可以测量不同 m_0 下的周期 T，作 T^2-m_0 图线，由其斜率，就可以得到弹簧的弹性系数 k. 这样就绕过了不易测量的物理量 m_S，使问题得以解决.

由于物理实验的内容十分广泛，可利用的实验方法和测量手段也很多，实验结果要受到误差等各种因素的相互影响. 因此，不可能给出一种制定实验方案的普遍适用的法则，以上所述只是给出了一些原则性的建议. 在具体的实验中还应根据具体情况，因地制宜，制定出切实可行的实验方案. 希望同学们通过本章设计性实验的实践、积累和总结，逐步培养和提高进行科学实验的能力和素质.

实验 6.1 易溶于水的颗粒状物质的密度测定

某种物质的质量和其体积的比值，即单位体积的某种物质的质量，叫做这种物质的密度. 密度在科学研究和生产生活中有着广泛的应用，如可用密度来鉴别组成物体的材料、可计算物体中所含各种物质的成分等. 对于鉴别未知物质，密度是一个重要的依据，因而密度的测量对物体性质的研究起着重要的作用. 对于规则的物体，用物理天平测出其质量，用测量长度的方法测出其体积，即可测量出物质的密度. 而对于不规则的物体，测量相

对就复杂些. 本实验要求学生自己设计实验方案，组装实验装置，至少用两种方法测定易溶于水的颗粒物质的密度.

【实验要求】

(1) 自行设计实验装置与步骤，用两种方法测量砂糖(或食盐)的密度.

(2) 测定给定混合物中砂糖与食盐的体积比(要求推导出体积比公式).

(3) 查阅相关资料，自行设计其他方法测量砂糖(或食盐)的密度(不受本实验给定仪器用具的限制)，如果时间充分，最好能用实验来实现.

【实验器材】

天平、医用注射器、铁支架、砝码若干、待测物(食盐和砂糖等)、润滑油、真空泥、比重瓶等.

【实验原理】

1. 根据玻-马定律，利用医用注射器测量砂糖的密度

为了防止空气泄漏，用真空泥将注射器一端密封. 设密封在注射器内的空气的体积为 V_{10}，压强为 P_{10}，加若干砝码等温压缩后空气体积为 V_{11}，压强为 P_{11}，由于温度不变，应有

$$P_{10}V_{10} = P_{11}V_{11} \tag{6.1.1}$$

加入质量为 m 的被测物质后，该物质与空气的总体积等于 V_{10}，设此时空气的体积为 V_{20}，压强为 P_{20}，加等量砝码等温压缩后使空气体积变为 V_{21}，压强为 $P_{21}(=P_{11})$，同理有

$$P_{20}V_{20} = P_{21}V_{21} \tag{6.1.2}$$

上面两式相除，得

$$\frac{V_{10}}{V_{20}} = \frac{V_{11}}{V_{21}}, \quad \frac{V_{21}}{V_{20}} = \frac{V_{11}}{V_{10}}$$

$$\frac{V_{20}-V_{21}}{V_{20}} = \frac{V_{10}-V_{11}}{V_{10}}$$

所以有

$$V_{20} = \frac{V_{20}-V_{21}}{V_{10}-V_{11}}V_{10} \tag{6.1.3}$$

被测物质的体积为

$$V = V_{10} - V_{20} = V_{10}\left(1 - \frac{V_{20}-V_{21}}{V_{10}-V_{11}}\right) \tag{6.1.4}$$

由上式推导可知，只要测出加入被测物质前后等温压缩过程的空气体积变化量 $(V_{10}-V_{11})$、$(V_{20}-V_{21})$ 及初始空气体积 V_{10}，即可求出被测物质体积 V，从而可得

$$\rho = \frac{m}{V}$$

2. 比重瓶法

对于易溶于水的颗粒物质的密度测定，其难点在于确定物质的体积，而质量是容易由

天平或电子称得.像砂糖、食盐一类物质溶解于水,对此类物质不能用直接溶解于水来测其体积,但可取它们的饱和水溶液来代替水,测定它们的密度.

以食盐为例,设比重瓶内盛满饱和的食盐水,质量为 m_1,加入质量为 m_2 的食盐颗粒后,装满饱和食盐水的比重瓶的质量变为 m_3,则被食盐颗粒从比重瓶中排出的饱和食盐水的质量为 $m=m_1+m_2-m_3$,而排出的饱和食盐水的体积就是质量为 m_2 的食盐颗粒的体积,所以食盐的密度为

$$\rho=\frac{m_2}{m_1+m_2-m_3}\rho_0 \tag{6.1.5}$$

式中,ρ_0 为对应温度时的饱和食盐水的密度.

实验 6.2 随机误差的正态分布研究

在物理量的测量中,由于在测量仪器、实验方法、环境状况以及观测者等方面存在某些不理想的情况,这些都会给测量结果带来误差. 这些误差分为系统误差和随机误差,系统误差可以在测量过程中设法消除或在测量结果中予以修正. 随机误差则必须予以估算. 本实验通过对单摆周期的测量,来对随机误差进行估算和分析.

【实验要求】

(1) 了解随机误差的分布规律以及标准偏差的意义.

(2) 设计用不同的方法测量单摆的周期 T,要求改变摆长和摆角,在相同条件下(同一摆长和摆角)重复测量至少 200 次.

(3) 运用相关软件或自己编程来计算 $\overline{T}$,标准偏差 S_T,并统计观测值落在区间$[\overline{T}\pm S_T]$、$[\overline{T}\pm 3S_T]$内的概率,作统计直方图.

(4) 对不同条件下的测量结果进行分析.

【实验器材】

单摆、光电门、米尺、数字毫秒计、计算机等.

实验 6.3 用气垫导轨研究动量守恒与机械能守恒定律

机械运动是物质最基本、最普遍的运动形式. 动量或能量实质上就是力对时间或空间的累积作用. 动量守恒定律与机械能守恒定律是机械运动中最普遍、最基本的定律. 但是,在通常情况下,物体总是受摩擦阻力和其他物体的作用,其能量在运动过程将逐渐减少,动量会有相应的变化. 因此,机械能守恒和动量守恒需要满足一定的条件才能实现.

【实验要求】

(1) 参考实验原理,并查阅相关资料,设计不同的实验方案,验证动量守恒与机械能守恒定律.

(2) 根据实验数据分析实验误差,并对气垫导轨上运动滑块所受阻力进行分析.

【实验器材】

气垫导轨(图 6.3.1)、数字毫秒计、滑块、游标卡尺、重物、弹簧、细线等.

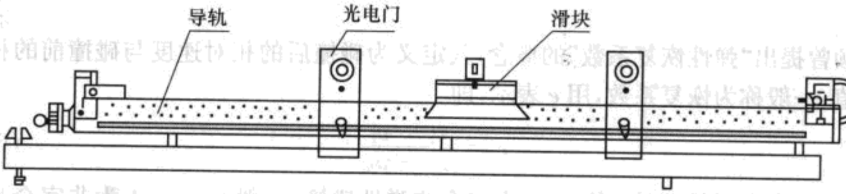


图 6.3.1　气垫导轨的基本装置图

【实验原理】

当系统所受的合外力为零,则该系统的总动量保持不变,这就是动量守恒定律.可在某一特定方向上应用动量守恒定律.若一个力学系统在一个方向上受力为零,则该力学系统在该方向的动量分量守恒.

当作用于质点系的外力和非保守内力不做功时,质点系的总机械能是守恒的,这就是机械能守恒定律.

本实验利用气垫导轨上摩擦力很小的特点,验证动量和机械能守恒定律.当气垫导轨水平时,置于其上的滑块的运动可以认为是匀速直线运动,当两滑块相碰时,忽略阻尼,满足动量守恒的条件.当引入保守力如重力、弹簧的弹性力时,忽略阻尼,满足机械能守恒的条件.

气垫导轨是利用从它表面的小孔喷出的压缩空气,使导轨表面与滑块之间形成一层很薄的"气垫",将滑块浮起,滑块在导轨表面运动时,就不存在接触摩擦力,而只有很小的空气黏滞力和空气阻力,滑块的运动可近似看成是无摩擦的运动.

1. 动量守恒

当两滑块在水平的导轨上沿直线做对心碰撞时,若略去滑块运动过程中受到的黏滞阻力和空气阻力,则两滑块在水平方向除受到碰撞时彼此相互作用的内力外,不受其他外力作用.根据动量守恒定律,两滑块的总动量在碰撞前后保持不变.

如图 6.3.2 所示,设滑块 1 和 2 的质量分别为 m_1 和 m_2,碰撞前二滑块的速度分别为 v_{10} 和 v_{20},碰撞后的速度分别为 v_1 和 v_2,则根据动量守恒定律有

$$m_1 \boldsymbol{v}_{10} + m_2 \boldsymbol{v}_{20} = m_1 \boldsymbol{v}_1 + m_2 \boldsymbol{v}_2 \tag{6.3.1}$$

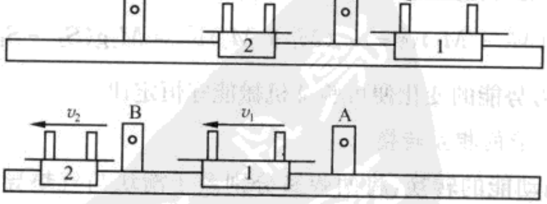


图 6.3.2

若写成标量的形式，即

$$m_1 v_{10} + m_2 v_{20} = m_1 v_1 + m_2 v_2 \tag{6.3.2}$$

式中，各速度均为代数值，各 v 值的正负号决定于速度的方向与所选取的坐标轴方向是否一致.

牛顿曾提出“弹性恢复系数”的概念，其定义为碰撞后的相对速度与碰撞前的相对速度的比值，一般称为恢复系数，用 e 表示，即

$$e = \frac{v_2 - v_1}{v_{10} - v_{20}} \tag{6.3.3}$$

当 $e=1$ 时为完全弹性碰撞，当 $e=0$ 为完全非弹性碰撞，一般 $0<e<1$ 为非完全弹性碰撞. 气轨滑块上的碰撞弹簧是钢制的，e 值在 0.95～0.98，它虽然接近 1，但是其差异也是明显的，因此在气轨上不能实现完全弹性碰撞.

1）非完全弹性碰撞

取大、小二滑块（$m_1>m_2$），将滑块 2 置于 A、B 光电门之间，使 $v_{20}=0$. 推动滑块 1 以速度 v_{10} 去撞滑块 2，碰撞后速度分别为 v_1 和 v_2，则

$$m_1 v_{10} = m_1 v_1 + m_2 v_2 \tag{6.3.4}$$

2）完全非弹性碰撞

此时 $e=0$，将滑块 2 置于光电门 A、B 间，而且 $v_{20}=0$，滑块 1 以速度 v_{10} 撞向滑块 2，碰撞后二滑块黏在一起以同一速度 v_2 运动.

碰撞前后的动量关系为

$$m_1 v_{10} = (m_1 + m_2) v_2 \tag{6.3.5}$$

2. 机械能守恒

1）重力势能与动能的相互转换

(1) 将气垫导轨一端用小圆片垫高，使导轨倾斜一个小角度 α，让滑块从高处自由下滑，用两个光电门分别测量滑块通过 A、B 点的时间，从而得到通过 A、B 点的动能. A、B 点的势能差为

$$\Delta E_p = Mg(S_B - S_A)\sin\alpha \tag{6.3.6}$$

式中，M 为滑块质量，S_A、S_B 分别为两光电门在气垫导轨上的坐标. 倾角 α 可以测量小圆片高度 h 和气垫导轨两支撑脚之间的距离 ΔL，通过关系式 $\tan\alpha = h/\Delta L$ 得到. 通过比较动能与势能的变化量便可验证机械能守恒定律.

(2) 将气垫导轨调水平，一端挂上重物 M_2，一端系于滑块 M_1 上，如图 6.3.3 所示，忽略阻尼，M_2 的重力势能转化为 M_1 与 M_2 的动能，根据机械能守恒列出方程

$$\frac{1}{2}(M_1 + M_2)v_1^2 - \frac{1}{2}(M_1 + M_2)v_2^2 = M_2 g(S_2 - S_1) \tag{6.3.7}$$

因此，比较动能与重力势能的变化便可验证机械能守恒定律.

2）弹性势能与动能的相互转换

对于弹性势能与动能的转换，将两弹簧分别系于滑块与气垫导轨两端，如图 6.3.4 所示.

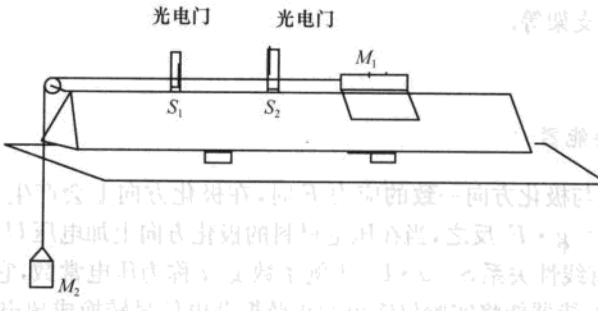


图 6.3.3

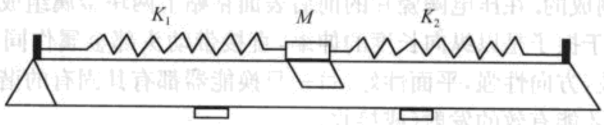


图 6.3.4

首先测出平衡位置坐标，然后在左右两边对称地取不同的振幅位置测量其速度. 根据机械能守恒，忽略阻尼，滑块在运动过程中满足方程

$$\frac{1}{2}Mv^2 + \frac{1}{2}Kx^2 = E_0 \tag{6.3.8}$$

式中，M 为等效质量，K 为两根弹簧的弹性系数之和，x 为滑块相对平衡位置的位移. E_0 为系统总能量，运动过程中保持不变，只取决于起振时的振幅.

根据上式可以从以下两方面体现机械能守恒：

(1) 对于相同的 x，滑块的速率 v^2 相等；

(2) 作 v^2-x^2 的关系图，应为线性关系.

实验 6.4　水中声速的测定

声波是一种在弹性媒质中传播的机械波. 声波在媒质中传播时，声速、声衰减等诸多参量都和媒质的特性与状态有关，通过测量这些声学量可以探知媒质的特性及状态变化. 对于声波特性的测量(如频率、波速、波长、声压衰减和相位等)是声学应用技术中的一个重要内容，特别是声波波速(简称声速)的测量，在声波定位、探伤、测距等应用中具有重要的意义.

【实验要求】

(1) 自己设计实验方案(至少两种)，组装实验装置，测定水中的声速.

(2) 对实验结果进行分析，提出改进方法.

【实验器材】

示波器、毫伏表、温度计(℃)、水槽、压电换能器、低频信号发生器、数字频率计、屏蔽

导线、游标尺、固定支架等.

【实验原理】

1. 压电陶瓷换能器

压电材料受到与极化方向一致的应力 F 时,在极化方向上会产生一定的电场,它们之间有线性关系 $U=g\cdot F$. 反之,当在压电材料的极化方向上加电压 U 时,材料的伸缩形变 S 与电压 U 也有线性关系 $S=a\cdot U$,比例系数 g、a 称为压电常数,它们与材料性质有关. 压电陶瓷超声换能器能将实验仪输出的正弦振荡电信号转换成超声振动. 压电陶瓷片是换能器的工作物质,它是用多晶体结构的压电材料(如钛酸钡、锆钛酸铅等)在一定的温度下经极化处理制成的. 在压电陶瓷片的前后表面粘贴上两块金属组成的夹心型振子,就构成了换能器. 由于振子是以纵向长度的伸缩,直接带动头部金属作同样纵向长度伸缩,这样所发射的声波,方向性强,平面性好. 每一只换能器都有其固有的谐振频率,换能器只有在其谐振频率,才能有效的发射(或接收).

2. 声速的测量方法可分为两类

第一类方法是直接法(脉冲法).

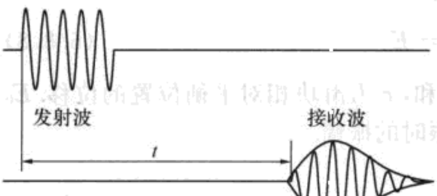


图 6.4.1　时差的测量

直接根据关系式 $v=S/t$,测出传播距离 S 和所需时间 t 后即可算出声速,称为“时差法”. 若以脉冲调制正弦信号输入到发射器,使其发出脉冲声波,经时间 t 后到达距离 L 处的接收器. 接收器接收到脉冲信号后,能量逐渐积累,振幅逐渐加大,脉冲信号过后,接收器作衰减振荡,如图 6.4.1 所示. 实验者测出 L 和 t 后,即可由 $v=L/t$ 计算声速.

第二类方法是间接法(波长-频率法),即利用波长频率关系式 $V=f\cdot\lambda$,测量出频率 f 和波长 λ 来计算出声速,测量波长时又可用“共振干涉法”或“相位比较法”.

1) 共振干涉(驻波)法测波长

到达接收器的声波,一部分被接收并在接收器电极上有电压输出,一部分被向发射器方向反射. 由波的干涉理论可知,两列反向传播的同频率波干涉将形成驻波,驻波中振幅最大的点称为波腹,振幅最小的点称为波节,任何两个相邻波腹(或两个相邻波节)之间的距离都等于半个波长. 改变两只换能器间的距离,同时用示波器监测接收器上的输出电压幅度变化,可观察到电压幅度随距离周期性的变化. 记录下相邻两次出现最大电压数值时游标尺的读数. 两读数之差的绝对值应等于声波波长的二分之一.

2) 相位比较(行波)法测波长

当发射器与接收器之间距离为 L 时,在发射器驱动正弦信号与接收器接收到的正弦信号之间将有相位差 $\varphi=2\pi L/\lambda=2\pi n+\Delta\varphi$.

若将发射器驱动正弦信号与接收器接收到的正弦信号分别接到示波器的 X 及 Y 输

入端，则相互垂直的同频率正弦波干涉，其合成轨迹称为李萨如图 6.4.2.



图 6.4.2 相位差不同时的李萨如图

当接收器和发射器的距离变化等于一个波长时，则发射与接收信号之间的相位差也正好变化一个周期(即 $\Delta\varphi=2\pi$)，相同的图形就会出现. 反之，当准确观测相位差变化一个周期时接收器移动的距离，即可得出其对应声波的波长 λ.

实验 6.5 落球法测定液体黏滞系数

在稳定流动的流体中，各层流体的速度不同就会产生切向力，快的一层给慢的一层以拉力，慢的一层给快的一层以阻力，这一对力称为流体的内摩擦力或黏滞力. 液体都具有黏滞性，这种黏滞性可以用黏滞系数 η 定量描述. 黏滞系数又称动力黏滞系数或简称黏度. 液体的黏度是液体黏滞性的量度，是反映液体黏滞性运动效果的物理量. 不同的液体具有不同的黏度，黏度只决定于液体本身的性质和温度，且随温度的升高而减小.

对液体黏滞性的研究在流体力学、化学化工、医疗、水利、材料学等领域都有广泛的应用. 例如，在用管道输送液体时要根据输送液体的流量、压力差、输送距离及液体黏度，设计输送管道的口径. 测量液体黏度可用落球法、毛细管法、转筒法等方法，其中落球法适用于测量黏度较高的液体.

【实验要求】

(1) 测定小球在蓖麻油中的下落速度并计算蓖麻油黏度.

(2) 分析小球在达到平衡速度之前所经路程.

【实验器材】

落球法黏滞系数测定仪、小钢球、蓖麻油、螺旋测微器、游标卡尺、钢板尺、激光光电计时仪、温度计等.

【实验原理】

如图 6.5.1 所示，当金属小球在静止黏性液体中下落时，它受到三个竖直方向的力：小球的重力 mg、液体作用于小球的浮力 ρgV(V 为小球体积，ρ 为液体密度)和黏滞阻力 F(其方向与小球运动方向相反). 如果小球的速度 v 很小，且液体可以看成在各方向上都是无限广阔的，则从流体力学的基本方程可以导出表示黏滞阻力的斯托克斯公式

$$F = 6\pi\eta rv \tag{6.5.1}$$

式中，η 为液体的黏滞系数，单位为 Pa·s，r 为小球的半径.

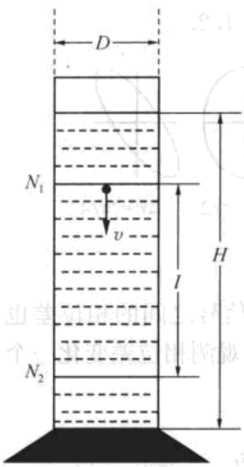


图 6.5.1

斯托克斯定律成立的条件有以下 5 个方面:①媒质的不均一性与球体的大小相比是很小的;②球体仿佛是在一望无际的媒质中下降;③球体是光滑且刚性的;④媒质不会在球面上滑过;⑤球体运动很慢,故运动时所遇的阻力系由媒质的黏滞性所致,而不是因球体运动所推向前行的媒质的惯性所产生.

小球开始下落时,由于速度尚小,所以阻力不大,但是随着下落速度的增大,阻力也随之增大.最后,三个力达到平衡,即

$$mg = \rho g V + 6\pi\eta r v$$

于是小球开始做匀速直线运动,由上式可得

$$\eta = \frac{(m - V\rho)g}{6\pi v r}$$

令小球的直径为 d,并用 $m=\frac{\pi}{6}d^3\rho'$,$v=\frac{l}{t}$,$r=\frac{d}{2}$ 代入上式得

$$\eta = \frac{(\rho' - \rho)gd^2 t}{18l} \tag{6.5.2}$$

式中,ρ' 为小球材料的密度,l 为小球匀速下落的距离,t 为小球下落距离 l 所用的时间.

实验时,待测液体盛于容器中,故不能满足无限深广的条件,实验证明上式应该进行修正.修正后的测量表达式为

$$\eta = \frac{(\rho' - \rho)gd^2 t}{18l} \cdot \frac{1}{\left(1 + 2.4\dfrac{d}{D}\right)\left(1 + 1.6\dfrac{d}{H}\right)} \tag{6.5.3}$$

式中,D 为容器的内径,H 为液柱高度.

当小球的密度较大,直径不是太小,而液体的黏度值又较小时,小球在液体中的平衡速度 v_0 会达到较大的值,奥西思-果尔斯公式反映出了液体运动状态对斯托克斯公式的影响

$$F = 3\pi\eta v_0 d\left(1 + \frac{3}{16}\mathrm{Re} - \frac{19}{1080}\mathrm{Re}^2 + \cdots\right) \tag{6.5.4}$$

式中,Re 称为雷诺数,是表征液体运动状态的无量纲参数.

$$\mathrm{Re} = \frac{v_0 d \rho_0}{\eta} \tag{6.5.5}$$

当 Re 小于 0.1 时,可认为(6.5.1)式、(6.5.3)式成立.当 $0.1<\mathrm{Re}<1$ 时,应考虑(6.5.4)式中 1 级修正项的影响,当 Re 大于 1 时,还须考虑高次修正项.

【附录】

钢的密度 $\rho \approx 7800\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$

蓖麻油的密度 $\rho_0 \approx 962\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$

蓖麻油的黏滞系数值与温度的关系见表 6.5.1

表 6.5.1

温度/℃	η/(Pa·S)	温度/℃	η/(Pa·S)	温度/℃	η/(Pa·S)	温度/℃	η/(Pa·S)
0	53.0	16	1.37	23	0.73	30	0.45
10	2.42	17	1.25	24	0.67	31	0.42
11	2.20	18	1.15	25	0.62	32	0.39
12	2.00	19	1.04	26	0.57	33	0.36
13	1.83	20	0.95	27	0.53	34	0.34
14	1.67	21	0.87	28	0.52	35	0.31
15	1.51	22	0.79	29	0.48	40	0.23

实验 6.6　音叉受迫振动中数据的微机实时采集与处理

受迫振动与共振现象在工程和科学研究中经常遇到,他们既有破坏作用,也有许多实用价值.例如在建筑、机械行业中,须避免共振现象产生的危害,而在一些石油工业及化工系统中,利用共振原理制成液体密度传感器或液位传感器,可精确测量容器中液体的密度或液位高度.许多电声器件是运用共振原理设计制作的.此外,在微观科学研究中"共振"也是一种重要研究手段,例如利用核磁共振和顺磁共振研究物质结构等.所以受迫振动与共振规律,受到广泛重视.

【实验要求】

(1) 研究振动系统在外力作用下振幅与强迫圆频率之间的关系.

(2) 应用微机的数据采集卡,将音叉受迫振动的振幅实时采集,送入微机处理后,绘出音叉受迫振动的共振曲线.

(3) 作出三种不同阻尼状态下的共振曲线,分析三种曲线的不同特性.

【实验器材】

电磁激励系统、低频信号发生器、毫伏表、微机、打印机、数据采集卡、示波器等.

【实验原理】

(1) 受迫振动的实验原理同实验 2.4.

(2) 数据采集卡.

数据采集卡共有四个部分:放大部分、转换部分、采集部分、I/O 选择部分.电路图如图 6.6.1 所示.

采集卡采用 12 位精度的 AD574 芯片进行 A/D 转换(模数转换),用 8255 实现 AD574 与 PC ISA 总线的数据交换,原始信号为 500Hz 左右,从几十毫伏到 1 伏左右.因此采用 LM741 运算放大器放大 6 倍左右,并用 IM4148 截去负半波.

板卡 I/O 口为硬件可调,有 8 个选择范围,可避免与 PC 上已有板卡冲突.硬件的分辨率经分析可达电压 0.1mV,额率 0.02Hz.

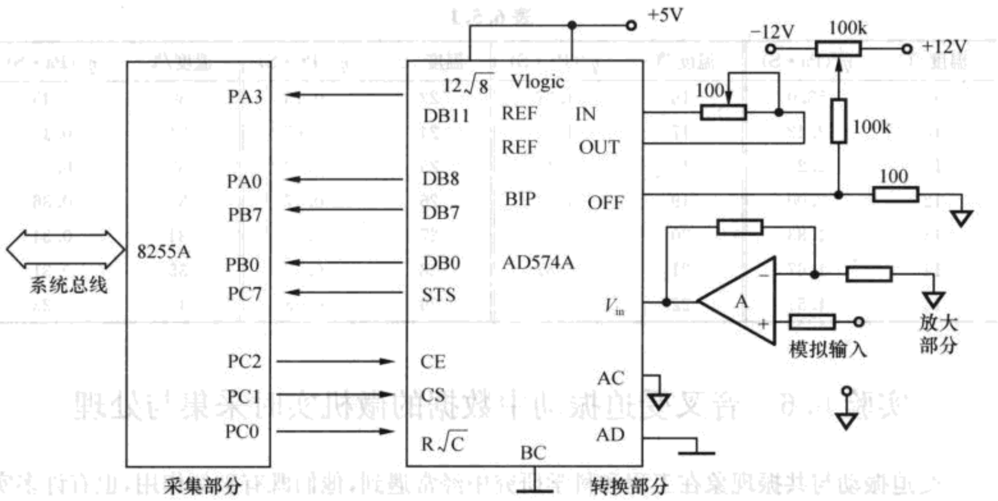


图 6.6.1

实验 6.7　智能导热系数测量仪及应用

材料导热系数的实验测定中，目前大多使用电位差计和电流计来人工测定计算导热系数，其缺点是自动化程度低、通用性差、调节过程复杂、测试结果容易受到人为因素的影响. 随着我国经济和科学技术的发展，各部门对新产品、新材料的导热系数测量越来越多，精度要求也越来越高，面对科研、生产的高要求，用微机和智能控制方法构成一种新型的数字测控系统是十分必要的. 智能导热系数的测控系统提高了材料特性测试的自动化和智能水平，同时提高了测量的效率和测试的精度，减轻了人员的劳动强度.

【实验要求】

(1) 了解智能导热系数测量仪的结构及工作原理.

(2) 测量不良导体的导热系数.

(3) 温度传感器的标定.

【实验器材】

智能导热系数测量仪、待测物、待标定的温度传感器等.

【实验原理】

导热是物质相互接触时由高温部分向低温部分传播能量的过程. 根据傅里叶导热定律，在物体内部，取两个垂直于热传导方向(如 z 方向)彼此相距 L 的平行面元 dS，若温度梯度为$\frac{dT}{dZ}$，则在 dt 时间内通过面元 dS 的热量 $d\theta$ 满足下式

$$\frac{d\theta}{dt}=-\lambda\left(\frac{dT}{dZ}\right)_{z_0}\cdot dS \tag{6.7.1}$$

式中，$\frac{d\theta}{dt}$为热流量，负号为热量沿温度降低的方向，λ 为该物质的导热系数，它为表征物质导热性能大小的物理量.

为了测量 λ，该仪器将待测样品放入两铜盘之间，对上铜盘进行加热，下铜盘向周围自由散热，当传热达到稳定状态时，上铜盘的温度 T_1 和下铜盘的温度 T_2 保持不变. 样品上表面的热流量与下表面通过铜盘向周围环境散热的速率相等，因此，只要求出了下铜盘温度 T_2 时的散热速率就测出了被测物的导热速率，经推导修正后得出不良导体的导热系数公式为

$$\lambda=-\frac{cMKL(D+4\delta)}{\frac{1}{2}\pi D^2(T_1-T_2)(D+2\delta)} \tag{6.7.2}$$

式中，c、M、D、δ、K、T_1、T_2 分别为铜盘的比热容、下铜盘的质量、直径、厚度、散热速率及稳态下的上铜盘温度和下铜盘温度，L 为待测物的厚度. 从(6.7.2)式可以看出，铜盘和待测物的几何尺寸及铜盘的质量、比热容都是常量. 因此，对 λ 的精确测量实际上转化为对温度的精确控制与测量.

【仪器介绍】

我室研制的智能导热系数测量仪的总体结构框图如图 6.7.1 所示.

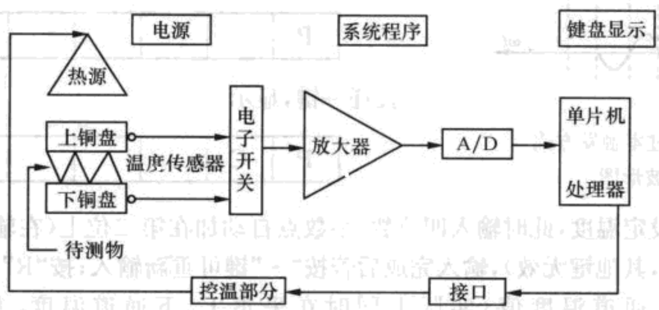


图 6.7.1

框图原理说明：首先由键盘输入，设置上铜盘的温度值，使红外灯对其加热，AD590 温度传感器将温度信号转换成电信号，送放大器放大，由 A/D 转换器转换成数字信号. 本仪器采用 MC7135，它输出动态扫描 BCD 码，其时钟信号由单片机的 AM 信号(1Mb)经 8155分频为 100kHz 信号供 MC7135 使用. 基准源由 MC1403 提供 2.5V 的电源，再由 10kΩ 电阻分压，获得高稳定度的 1V 基准源. MC135 输出 SIB 信号，它在一次转换中产生 5 个负脉冲，将其作为中断信号以便读取数据.

控温部分见图 6.7.2，利用双向可控硅交流调压的过零触发控制. 该方式当固态继电器(MOC3041)有控制信号输入时，在交流电源电压为零附近使双向可控硅导通，将负载电路与交流电源接通几个周波，然后再断开几个周波，通过改变通断时间比值达到交流调

压的目的，实现对上铜盘温度的自动调节，其波形见图 6.7.3. 如图 6.7.2 所示系统中电阻 R_2 是双向可控硅 G 极和 T_1 极之间的分流电阻，保护双向可控硅不会因电压上升率 dU/dt 过大而误导通，提高了工作电路的可靠性，R_1 为固态继电器输出端的限流电阻，R_3 和 C_1 组成浪涌吸收电路，防止交流电源中的尖峰电压，浪涌电流对双向可控硅会产生冲击和干扰.

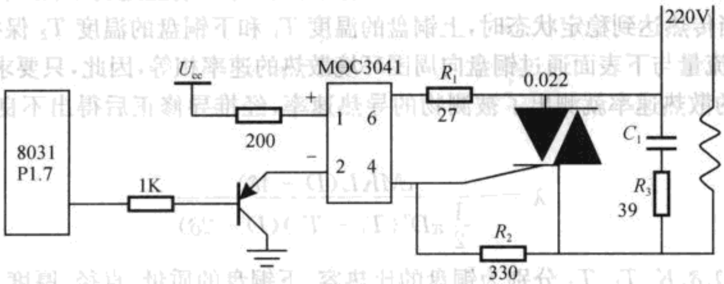


图 6.7.2　双向可控硅交流调压过零触发温控电路原理图

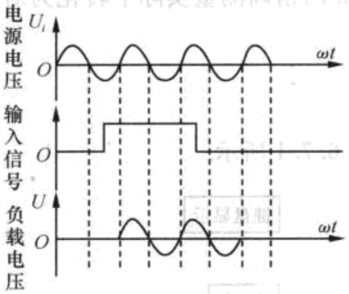


图 6.7.3　过零触发方式控制波形图

仪器操作说明：

(1) 压下实验装置中的操作杆，将待测物放入上下铜盘之间，松开操作杆使下铜盘处于水平状态，放置好红外灯泡.

(2) 开机、程序执行后，LED 显示.

P					

按任一键，显示

P	C				

表示开始输入设定温度，此时输入四位数. 小数点自动加在第二位上(在输入过程中只能按 0~9 数字值，其他键无效)，输入完成后若按"＊"键可重新输入；按"R"键则确认. 此后程序就显示上通道温度值(实际上同时在采集上、下通道温度，并将差值送入 8155RAM).

(3) 在采集过程中，按相应键执行相应功能：

"0"　查看上铜盘当前温度.

"1"　查看下铜盘当前温度.

"2"　查看环境温度.

"3"　显示设定值.

"4"　查询存储的温差值(总是保存最近约 4 分钟的温差).

先显示序号，后显示数值，按"1"向上翻页，按"7"向下翻页，且首尾相连(可自动判断有多少个数)，按"R"或不按键超过 2s 时返回. 按"＊"键复位，重新执行程序.

(4) 在上、下铜盘的温度值保持 10min 不变后，即可认为系统达到了稳定导热状态，

记下上、下铜盘的温度值.

详见《工业仪表与自动化装置》中王承彦等发表的"智能导热系数测量仪的研制"一文.

实验6.8　简易火灾报警器的电路设计与制作

人们日常生活中离不开火，火灾很容易发生.即使并不是直接使用火，我们使用各种电子产品和机械装置，也很容易失火，而对付火灾最好的方法就是预防.当火灾即将发生或刚发生时，如果能够产生报警使人们注意到，便能够有效地避免火灾带来的重大损失.本实验正是根据现实需要，要求学生查阅资料，结合自己所学的知识，设计制作一个简易的火灾报警器.

【实验要求】

(1) 各种电子元件的识别与测试.

(2) 了解各种火灾报警器的结构与原理.

(3) 结合所学电学与热力学知识，自己设计电路，制作简易火灾报警器.

【实验器材】

直流电源、万用电表、蜂鸣器、喇叭、电路板、连接线、热敏电阻、光敏电阻、二极管、三极管及其他各种电阻等.

【实验原理】

1. 火灾报警器的原理

火灾发生时，必然会伴随着产生烟雾、高温和火光，探测器对这些都很敏感.当有烟雾、高温、火光产生的时候，它就改变平时的正常状态，引起电流、电压或机械部分发生变化或位移，再通过放大、传输等过程，发出警报声，有的还能同时发出灯光信号，并显示发生火灾的部位、地点.

火灾报警的电路设计大体上包括报警触发电路和报警信号电路两部分，具体的原理由于所设计电路不同而差别很大.

2. 火灾探测器

火灾探测器主要分感烟、感温、光辐射三大类

(1) 感烟探测器.一种是离子感烟探测器，它在内外电离室里面有放射源241，电离产生的正、负离子，在电场的作用下各向正负电极移动.在正常的情况下，内外电离室的电流、电压都是稳定的.一旦有烟雾窜逃外电离室，干扰了带电粒子的正常运动，使电流，电压就有所改变，破坏了内外电离室之间的平衡，于是就发出了信号.还有一种叫光电感应探测器，它有一个发光元件和一个光敏元件，平常光源发出的光，通过透镜射到光敏元件

上,电路维持正常,如果有烟雾从中阻隔,到达光敏元件上的光就显著减弱,于是光敏元件就把光强的变化变成电的变化,通过放大电路向人们报警.还有一种叫管道抽吸式感烟探测器,它的工作原理与光电感应探测器中另一种散射型相似,通过烟雾的反射或散射产生光敏电流,主要用在船舶上.近年来还出现了激光感烟探测器,它也是利用光电感应原理,不同的是光源改用激光束.

(2) 感温探测器.一种是运用金属热胀冷缩的特性.正常的情况下,探测器的电路断开;当温度升到一定值时,由于金属膨胀、延伸,导体接通,于是发出了信号.一种是利用某些金属易熔的特性,在探测器里固定一块低熔点合金,当温度升到它的熔点(70~90℃)时,金属熔化,借助弹簧的作用力,使触头相碰,电路接通,发出信号.这二种探测器都属定温型,即当外界温度超过某一限值时就报警.还有一类是差温型,升温的速度超过特定值时,便会感应报警.如将两者结合起来,便成为差定温组合式.

(3) 光辐射探测器.一种是红外光辐射探测器.物质在燃烧时,由化学反应产生闪烁的红外光辐射使硫化铅红外光敏元件感应,转变成电信号,经放大后,就能向人们报警.另一种是紫外光辐射探测器,则利用有机化合物燃烧时,火光中的外光,使紫外光敏管的电极激发出离子,通过继电器等,就能打开开关电路报警.

实验 6.9　干涉法测量金属的线膨胀系数

【实验要求】

(1) 理解材料线膨胀系数的物理意义.

(2) 学习用光学干涉法测量微小伸长量 ΔL 的原理与方法.

(3) 设计并实施实验方案,用干涉法测量金属的线膨胀系数.

【实验器材】

YJ-RZ-4A 数字智能化热学综合实验仪(见实验 2.15)、游标卡尺、金属试件、光源、光学元器件等.

实验 6.10　测量给定电阻丝的电阻值和电阻率

【实验要求】

(1) 用给定的仪器用具和限定的条件设计实验方案,测量给定电阻丝的电阻值和电阻率.若测量方法有多种,请分别论述,比较其优劣后,选择最佳方案进行测量.

(2) 依据实验方案画出测量电路图,写出原理公式;简述测量步骤;写出实验结果的完整表达式;分析测量结果的主要误差来源和性质.

【实验器材】

两个电压值未知但恒定且不相等的直流稳压电源、长度约为1米的待测电阻丝一根、

0～99 999.9Ω 电阻箱(阻值准确)一个、毫米分度的米尺一把、螺旋测微计一个、单刀双掷开关一个.

实验 6.11 用自组电位差计测量甲电池的电动势及内阻

【实验要求】

(1) 用给定的仪器用具,按限定条件,组装一台电位差计;用组装的电位差计测量电动势时,被测值必须从电阻箱上直接读出,并且每 1.0Ω 表示 0.1 毫伏.

(2) 设计并简述实验方案,绘出电路原理图,写出原理公式;简述测量步骤;写出实验结果的完整表达式.

(3) 标明该电位差计的测量范围.

【实验器材】

甲电池两个,待测 1 号干电池一节,0.005 级的标准电池一个,分度值为 10^{-9} A 的灵敏检流计一台,0～99 999.9Ω 电阻箱(阻值准确)两个,0～3kΩ、0～5kΩ 滑线变阻器各一个,单刀双掷开关两个.

实验 6.12 PN 结物理特性测定

【实验要求】

(1) 用运算放大器组成电流-电压变换器测量微弱电流.

(2) 测量 PN 结电流与电压的关系,证明此关系符合玻耳兹曼分布定律.

(3) 在恒定正向电流条件下,测绘 PN 结正向压降随温度变化曲线,并由此确定 PN 结正向压降随温度变化的灵敏度,及被测 PN 结材料的禁带宽度.

(4) 根据实验原理及结论将该 PN 结制成温度传感器,使其灵敏度最大,试确定其工作电流及其测量范围,并标定其刻度.

【实验器材】

直流电源两组:量程分别为 0～15V 和 0～1.5V 连续可调;
数字电压表两组:三位半数字电压表;量程 0～2V,四位半数字电压表;量程 0～20V;
恒温控制装置:控温范围为室温～80℃,分辨率 0.1℃;
TIP31c、3DG6 三极管各 1 只、铂电阻 1 支、LF356 运算放大器 1 个.

【提示】

理想的 PN 结的正向电流 I_F 和正向压降 V_F 存在如下近似关系式:

$$I_F = I_S \exp\left(\frac{qV_F}{kT}\right) \tag{6.12.1}$$

式中，q 为电子电荷，k 为玻尔兹曼常数，T 为绝对温度，I_S 为反向饱和电流，它是一个和 PN 结材料的禁带宽度以及温度有关的系数，可以证明

$$I_F = CT^r \exp\left(-\frac{qV_g(0)}{kT}\right) \tag{6.12.2}$$

式中，C 为与结面积、掺杂浓度等有关的常数，r 也为常数，$V_g(0)$ 为绝对零度时 PN 结材料的带底和价带顶的电势差.

将(6.12.2)式代入(6.12.1)式，两边取对数可得

$$V_F = V_g(0) - \left(\frac{k}{q}\ln\frac{C}{I_F}\right)T - \frac{kT}{q}\ln T^r = V_1 + V_{n1} \tag{6.12.3}$$

式中

$$V_1 = V_g(0) - \left(\frac{k}{q}\ln\frac{C}{I_F}\right)T$$

$$V_{n1} = -\frac{kT}{q}\ln T^r$$

方程(6.12.3)式就是 PN 结正向压降作为电流和温度函数的表达式，它是 PN 结温度传感器的基本方程. 令 I_F＝常数，则正向压降只随温度而变化，但是在方程(6.12.3)式中还包含非线性项 V_{n1}. 由 V_{n1} 项所引起的非线性误差请实验者作详细的分析.

实验 6.13　光敏电阻的特性与光开关的设计

【实验要求】

(1) 测量光敏电阻的物理特性.

(2) 自行设计并组装光开关.

【实验器材】

直流稳压电源一台、电流表一台、电压表一台、光敏电阻一支、照度计一台、亮度可调的白光光源一个、发光管二极管一支、555 时基集成电路芯片一个、电阻若干.

【提示】

555 时基集成电路的主要参数为(以 NE555 为例)电源电压 4.5～16V. 输出驱动电流为 200mA. 作定时器使用时，定时精度为 1%. 作振荡使用时，输出的脉冲的最高频率可达 500kHz. 使用时，驱动电流若大于上述电流时，在脚③输出端加装扩展电流的电路.

根据光敏电阻物理特性曲线，用光敏电阻、555 时基集成电路、发光管二极管等元器件，设计组装光开关电路，要求：当无光或光弱时，使发光二极管发光，当光照较大时，发光二极管不发光.

实验6.14 三相电参数的测定

【实验要求】

(1) 测量三相电的星形接法中,各相电压、线电压之间的参数. 测量时,以灯泡为负载,要求在负载相等、负载不相等、接中线、不接中线这四种情况下进行测量.

(2) 测量三相电的三角形接法中,各相间的电压值.

(3) 设计控制三相电机正、反转的电路.

【实验器材】

三相闸刀开关、220V灯泡、电阻、单刀开关、交流伏特表、三相电机一台.

实验6.15 变压器参数及特性测定

【实验要求】

(1) 设计测量方案,绘制电路图.

(2) 测量、计算单相铁芯变压器的各项参数.

(3) 测绘变压器的空载特性与外特性.

【实验器材】

交流电压表(0~450V)2台、交流电流表(0~5A)2台、1台、试验变压器(220V/36V、50V·A)1台、自耦调压器1台、白炽灯(220V、15W)5个.

【提示】

(1) 测量,计算单相铁芯变压器的各项参数为:电压比 $K_U=\frac{U_1}{U_2}$,电流比 $K_I=\frac{I_2}{I_1}$,原边阻抗 $Z_1=\frac{U_1}{I_1}$,副边阻抗 $Z_2=\frac{U_2}{I_2}$,阻抗比$=\frac{Z_1}{Z_2}$,负载功率 $P_2=U_2I_2\cos\phi_2$,损耗功率 $P_o=P_1-P_2$,功率因数 $Q=\frac{P_1}{U_1I_1}$,原边线圈铜耗 $P_{Cu1}=I_1^2R_1$,副边铜耗 $P_{Cu2}=I_2^2R_2$,铁耗 $P_{Fe}=P_o-(P_{Cu1}+P_{Cu2})$.

(2) 铁芯变压器是一个非线性元件,铁芯中的磁感应强度 B 决定于外加电压的有效值 U. 当副边开路(即空载)时,原边的励磁电流 I_{10} 与磁场强度 H 成正比. 在变压器中,副边空载时,原边电压与电流的关系称为变压器的空载特性,这与铁芯的磁化曲线(B-H 曲线)是一致的.

(3) 空载实验通常是将高压侧开路,由低压侧通电进行测量,又因空载时功率因数很低,故测量功率时应采用低功率因数瓦特表. 此外因变压器空载时阻抗很大,故电压表应接在电流表外侧.

(4) 变压器外特性测试. 为了满足三组灯泡负载额定电压为220V的要求,故以变压器的低压(36V)绕组作为原边,220V的高压绕组作为副边,即当作一台升压变压器使用. 在保持原边电压U_1(=36V)不变时,逐次增加灯泡负载(每只灯为15W),测定U_1、U_2、I_1和I_2,即可绘出变压器的外特性,即负载特性曲线$U_2=f(I_2)$.

实验6.16　电源(电池)的特性研究

【实验要求】

(1) 分别用伏安法、安阻法和伏阻法测量给定待测甲电池的电动势和内电阻.

(2) 比较用以上三种方法所测得结果,分析其误差的大小,说明每种方法的误差来源.

【实验器材】

直流稳压电源、电压表、电流表、电阻箱、待测甲电池.

实验6.17　霍尔法测磁滞回线

【实验要求】

(1) 用以霍尔元件为传感器的高精度数字式磁感比强度测定仪(数字式特斯拉仪),精确测量材料的磁滞回线和磁化曲线.

(2) 设计测量方案,绘制原理图,写出原理公式.

(3) 简述测量过程中消磁、磁锻炼的意义与步骤.

(4) 绘制被测样品材料的磁化曲线和磁滞回线.

【实验器材】

直流稳流源、交流电压源、数字式特斯拉仪、(以霍尔传感器为探测器,并有螺旋装置移动,霍尔探头的位置可借助移动架上指示的标尺读数记录.)待测环形磁性材料(上面绕有2000匝线圈,样品的截面为2.00cm×2.00cm,空隙为0.2cm)、双刀双掷开关等.

实验6.18　简易万用电表的设计与校准

【实验要求】

(1) 将微安表头改装成0～1和0～10mA电流表,要求用闭路抽头转换电路. 对10mA量程的电流表,要求逐点校准,并画出校准曲线;对1mA量程只要求校准满量程点.

(2) 将微安表头改装成1kΩ·V^{-1},量程0～2和0～5V电压表,并校准其满量程点.

(3) 设计一个$R_{中}$=1200Ω的欧姆表,要求U在1.3～1.5V范围内欧姆表能调零. 用

电阻箱校准欧姆表，画校准曲线．用组装好的欧姆表测一未知电阻．

【实验器材】

微安表头(100μA)、电阻箱、数字万用表、电流表(0.5 级，0～10mA)，电压表(0.5 级，0～2 和 0～5V)、变阻器、直流电源、甲电池、电位器、电阻若干．

【提示】

设计万用电表时，为了兼顾电压和电阻的测量，首先将微安表头改装成电流、电压和电阻共用的电流表，通常采用如图 6.18.1 所示的闭路抽头转换分流电路．用最小电流挡作为万用电表公用，如本实验的 0～1mA 电流挡．

磁电式表头并联一个适当的分流电阻可以改装成一个所需量程的电流表；串联一个适当的降压电阻 R 可改制成一个电压表．

(1) 电流表原理(略)．

(2) 电压表原理(略)．

(3) 欧姆表原理．

欧姆表原理性电路如图 6.18.2 所示，当待测电阻 R 接入测试端 a 和 b 时，流过电流表的电流为

$$I_x = \frac{U}{R_g + R' + R_x} \tag{6.18.1}$$

式中，U 为干电池电动势，R_g 为电流表内阻，R' 为限流电阻．U、R_g，R' 给定后，I_x 仅由 R_x 决定．

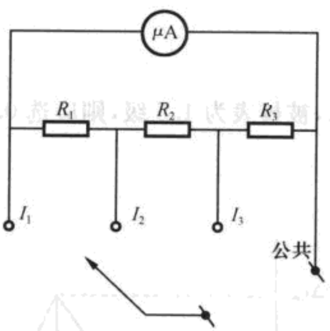


图 6.18.1　多量程电流表

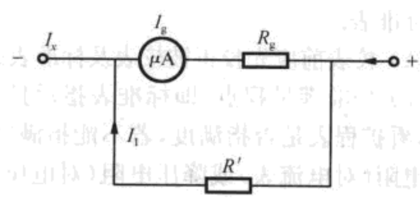


图 6.18.2　欧姆表原理

当 $R_x=0$ 时，选择 R' 数值使电流表满偏．即

$$I_g = \frac{U}{R_g + R'} \tag{6.18.2}$$

当 $R_x = R_g + R'$ 时，$I_x = I_g/2$ 时，电流表指针指向刻度线的中点，习惯上用 $R_中$ 表示 $R_g + R'$，即 $R_中 = R_g + R'$，称之为欧姆表的中值电阻式，于是，(6.18.2)式可以写为

$$I_g = \frac{U}{R_中} \tag{6.18.3}$$

由(6.18.1)式可以看出 I_x 和 R_x 不成线性比例关系，所以欧姆表的刻度是不均匀的．在使用欧姆表时一般用其中间一段刻度（如 $R_{中}/5 \sim 5R_{中}$）以减小测量误差．

(6.18.3)式是设计欧姆表的基本公式，电源 E 一般选用 1.5V 干电池，根据对 $R_{中}$ 的要求，由(6.18.3)式可求出 I_g，由此可选择合适的电流表做表头，以及限流电阻 R' 数值．例如，设计一个 $R_{中}=1500\Omega$ 的欧姆表，则 $I_g=1.5V/1500\Omega=1mA$，因此可选用量程为 1mA 的电流表作为欧姆表的表头．若此表头内阻 $R_g=270\Omega$，则

$$R' = R_{中} - R_g = 1500\Omega - 270\Omega = 1230\Omega$$

以上设计的欧姆表要求电源 E 保持 1.5V 不变．但实际上干电池电动势并非恒定，这将给测量带来很大误差，因此需要有“零欧姆调整器”，即将测试端 a 和 b 短路，通过调节零欧姆调节器使电流表指满刻度．实际欧姆表通常如图 6.18.3 所示，R_1 和 R_2 是电流表的分流电阻，改变电阻 R_2（以电位器代之）可用做零欧姆调整器．设计欧姆表时，若 $R_x=0$，可让回路总电流 I 略大于电流表满度电流 I_g（1mA）．比如选 $R_{中}=1200\Omega$，则 $I=\frac{1.5V}{1200\Omega}=1.25mA$，选择合适的 R_1 和 R_2，使得 $E=1.5V$ 时 R_1 和 R_2 支路的分流电流 $I_2=0.5mA$，因此流过电流表的电流 $I_1=1mA$．当 E 下降，低于设计值时，增大 R_2，使 I_2 减小，以保持 I_1 仍为 1mA．同理，若更换新电池，E 高于设计值，则可减小 R_2，使 I_2 增大，仍可保持 I_1 为 1mA．这就是 R_2 可用做零欧姆调整器的原理．

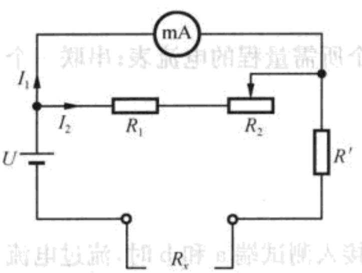


图 6.18.3　欧姆表调零电路

【附录】

1. 电流表和电压表的校准

(1) 选择标准表的级别要比被校准表高 2 级．例如，被校表为 1.5 级，则应选 0.5 级表作标准表．

(2) 校表前应先校正被校表及标准表的机械零点．

(3) 校准满量程点．即标准表指示扩程表量程数值，看扩程表是否指满度，若不能指满度，则应调分流电阻（对电流表）或降压电阻（对电压表），直到扩程表指满度．

(4) 校准分度值．被校表如 I_x 选整刻度，读校准表数值 I_s．画校准曲线如图 6.18.4 所示的 ΔI-I_x 曲线，图中，$\Delta I=I_S-I_x$．

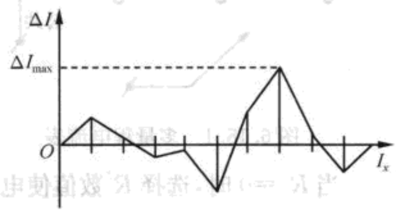


图 6.18.4　电表校正曲线

(5) 仪表的准确度和定标：

根据仪表准确度的定义，仪表的准确度等级应为

$$等级\% = \frac{最大绝对误差}{量程} \times 100\% \tag{6.18.4}$$

如果取 n 个等间隔的测量点，同时计算出被校表示值 I_x 和 I_S 表示值之间的差值，根据(6.18.4)式有

$$\text{等级}\ \% = \frac{|I_x - I_S|_{max}}{\text{量程}} \times 100\% \tag{6.18.5}$$

式中，下标 max 为仅取 n 个测量数值中差值最大的一个. 得到计算结果后，可以根据国家标准给出的 11 个等级来确定被校表的级别. 这些等级为 0.05，0.1，0.2，0.3，0.5，1.0，1.5，2.0，2.5，3.0，5.0. 由于给出的等级必须含盖该仪表的所有误差，因此在确定级别的时候必须注意正确的靠级. 例如，计算出的结果为 0.51，则该仪表的准确度等级为 1.0，而不是 0.5.

2. 欧姆表的校准

用电阻箱做为标准电阻

(1) a 和 b 两端短路($R_x=0$)，调 R_2 使得表头满偏.

(2) a 和 b 两端接入电阻箱，调电阻箱数值，使表头指针指在表盘中间刻度. 记下电阻数值，与设计要求的中值电阻值相比较.

(3) 校准其他刻度值.

(4) 画校准曲线(I-R_x 曲线).

(5) 计算 $R_{中}$ 值的相对误差.

实验 6.19 小功率直流稳压电源的设计与制作

电子设备通常要有一个(或几个)输出电压比较稳定的直流电源(如 $+E_c$、$-E_c$ 等)，它主要由整流滤波电路和稳压器组成. 前者的任务是变交流电为直流电，后者的任务是在电网电压波动或负责电流改变时自动维持电源的输出电压稳定.

【实验要求】

1. 设计一台小功率直流稳压电源，要求

(1) 直流输出电压 $U_{OC}=8\text{V}$，最大输出电流 $(I_{OC})_{max}=100\text{mA}$.

(2) 稳定度：

① 当电网电压变化 ±10% 时，输出电压 U_{OC} 的变化小于 ±5%.

② 电源的内阻 $r_n \leqslant 0.5\Omega$(表示 I_{OC} 由 0 变到 100mA 时，$\Delta U_{OC} \leqslant 0.5\Omega \times 100\text{mA} = 0.05\text{V}$，为输出电压 $U_{OC}=8\text{V}$ 的 0.6%).

(3) 输出端纹波电压小于 4mV(有效值).

2. 实验报告要求

(1) 列出设计题目和技术指标要求.

(2) 写出设计步骤和电路中各参数的计算结果.

(3) 画出标有元件值的电路图.

(4) 写出小功率直流稳压电源的制作过程和性能指标的测试过程.

(5) 将各项性能指标的实测值与设计值进行比较.

【实验器材】

变压器(220V 输入,12V 输出)、示波器、万用电表、电路所需元器件等.

【提示】

稳压电源的指标可分为两部分:

(1) 特性指标,如输出电流、输出电压及电压调节范围等.

(2) 质量指标,反映一个稳压电源的优劣,包括稳定度、等效内阻(输出电阻)、纹波电压及温度系数等.

实验 6.20 数字电子秤的设计与制作

应变片电阻在应力作用下,其阻值将发生改变,利用电桥的非平衡特性和电桥电路灵敏度高的特性,可以设计制作应力测量装置,也可以作为电子秤使用.

【实验要求】

(1) 测绘应力片电阻在应力作用下,应力与其阻值变化的关系曲线.

(2) 选择曲线中线性关系较好的部分进行设计,组成应力传感器.

(3) 对设计的应力传感器定标,用数字万用表直流 200 毫伏挡作为电子秤的重量显示器.

(4) 编写该传感器的工作原理及电子秤的使用说明.

【实验器材】

直流稳压电源、电路板、数字万用表、弹性片、应力片电阻、电烙铁、砝码、电阻箱等.

【提示】

(1) 比例臂比率的选取与各个臂阻值大小的选取会影响其灵敏度.

(2) 在设计制作时,要充分考虑到其线性度.

实验 6.21 数字温度计的设计与制作

AD590 集成温度传感器是 AD 公司利用 PN 结正向电流与温度的关系制成的电流输出型两端温度传感器. 这种器件在被测温度一定时,相当于一个恒流源. 该器件具有良好的线性和互换性,测量精度高,并具有消除电源波动的特性. 即使电源在 5~15V 变化,其电流变化小于 $1\mu A$.

【实验要求】

(1) 设计传感器特性测量的电路图，测量 AD590 的特性.

(2) 设计一个用 AD590 精确测量 0～100℃范围内温度的电路，使数字万用表的直流 200mV 挡显示的数字正好是摄氏温度的读数.

【实验器材】

加热炉、温度控制仪、AD590 集成温度传感器、电阻箱 3 个、2000ml 大烧杯、冰块、保温瓶、温度计、直流电压源、三位半数字万用表.

【提示】

(1) AD590 集成电路传感器由多个参数相同的三极管和电阻组成，当该器件的两引出端加有某一个直流工作电压时(一般工作电压在 4.5～20V 内)，它的输出电流与温度满足关系

$$I = \beta\theta + \alpha$$

(2) AD590 工作电压为 10～15V，不能小于 4V，否则会出现非线性. AD590 集成温度传感器的正负极不能接反，红线表示正极，黑线为负极.

(3) 利用非平衡电桥和 AD590 制成摄氏温度计.

实验 6.22　太阳能电池基本特性测定

太阳能的利用和太阳能电池特性研究是 21 世纪新型能源开发的重点课题. 目前硅太阳能电池应用领域除人造卫星和宇宙飞船外，还应用于许多民用领域，如太阳能汽车、太阳能游艇、太阳能收音机、太阳能计算机、太阳能乡村电站等. 太阳能是一种清洁、“绿色”的能源. 目前，世界各国都很重视对太阳能电池的研究和利用.

【实验要求】

(1) 了解太阳能电池的结构及环保、节能特点.

(2) 理解太阳能电池 I_{SC}、U_{OC}、P_m 及 FF 等基本参量的物理意义.

(3) 设计并实施实验方案，测定太阳能电池的基本特性.

【实验器材】

光具座、滑块座、太阳能电池、数字万用表、电阻箱、直流电源、白光源、数字式光功率计等.

实验 6.23　温差电现象的研究

温差电是研究温差和电之间的关系或者说是研究热能和电能直接转换的科学. 温差

电从发现至今已经有一百多年的历史了,但由于金属的温差电效应非常微弱,所以在很长一段时间内并未得到广泛的应用.自从人们发现用半导体和金属氧化物代替金属可以使温差效应得到明显提高后,温差电效应的应用翻开了新的一页.目前,温差电效应在航空航天、军事和生产生活中的应用得到了长足的发展,特别是在发电和制冷这两个方面.温差发电能够促进能源结构的多元化,缓解能源危机,具有很强的稳定性且无污染,如放射性同位素温差电源;而在制冷方面,与传统的制冷工艺相比,温差制冷具有很大的优越性,如便携式手提冰箱等.

【实验要求】

(1) 理解温差电现象的物理规律.

(2) 了解热电转换仪的基本结构及工作过程.

(3) 研究塞贝克效应(Seebeck effect)和帕尔帖效应(Peltier effect).

【实验器材】

热电转换仪、盛水容器、低压交直流电源、温度计等.

实验 6.24 内调焦望远镜的组装

望远镜是一种帮助人们看清远处物体以便观察、瞄准与测量的助视仪器.为了适合不同用途和性能的要求,望远镜的种类较多,结构也有差异.从调焦系统的差别来说有外调焦望远镜和内调焦望远镜,后者是大地测量仪器的重要部件.

本实验通过内调焦望远镜的组装,了解望远镜的基本构造和工作原理;进一步学习光具组组合的基本原理、各种透镜组焦距的测量方法及其条件分析;进一步掌握光学系统的共轴调节技术,并学习望远镜放大倍率的测量方法.

【实验要求】

1. *在光具座上组装 $M=-30$ 的内调焦望远镜*

(1) 自行选择测量方法和仪器,测定物镜 L_1、调焦镜 L_2 的焦距 f_1'、f_2' 与截距 l_1'、l_2,以及目镜的焦距 f_e'.

测量焦距的方法有多种,要求所选用的方法使得测量结果的精度较高(误差较小),所选用的方法和所选用仪器的测量范围能够满足待测透镜组的需要,所选方法简便易行.

(2) 将物镜 L_1 和调焦镜 L_2 组合成望远镜的物镜.

组合方法除原理中介绍的先计算确定 AB 的方法外,还有其他方法.例如,先将 L_1、L_2 组合成无焦系统,此时 F_1' 和 F_2 重合,再使 L_2 向 L_1 方向推进 Δ,即 $F_1'F_2=\Delta$.组装方法自行选定,拟定步骤后完成组装.

(3) 望远镜系统组装.

将组合物镜与目镜组装成 $M=-30$ 的内调焦望远镜,使组装后的望远镜能接收平

行光.

整个系统组装应特别注意等高共轴调节，如整个系统达不到等高共轴要求，则组合后的望远镜像差会偏大，且其放大倍率也会达不到 $M=-30$ 的要求.

2. 望远镜放大倍率的测定

自拟方法实测组装望远镜的放大率，与设计值比较，分析测量值的误差来源.

【实验器材】

光源、光具座、物镜 L_1、调焦镜 L_2、目镜、圆孔光阑、平行光管、游标卡尺、读数显微镜、焦距仪等.

【实验原理】

望远镜的基本光学系统是由两个共轴的光学系统——物镜和目镜组成的（物镜通常是复合的消色差会聚透镜组，目镜通常也是透镜组）. 当用于观察无限远的物体时，物镜的第二焦点与目镜的第一焦点重合，即两系统的光学间隔为零；当观察有限远的物体时，两系统的光学间隔是一个不为零的小数值.

用望远镜观察有限远的物体时，其物像关系如图 6.24.1(a)所示. 由于目标通过物镜所成的像位于焦平面的后面 A'处，则目镜应该对 A'点调焦才能看清成像. 为此，应该把目镜和分划板相对于物镜的间隔增大 $\Delta d=F'A'$，使望远镜的光学间隔从 $\Delta=0$ 变到 $\Delta=F'A'$.

用光学零件位置上的变化，实现调焦作用的光学系统称为调焦系统. 望远镜的调焦系统分外调焦和内调焦. 若以目镜相对于物镜的位置变化实现调焦作用，则该系统称为外调焦系统；如图 6.24.1(b)所示为另一种调焦望远镜，当物体在有限远时，移动物镜中的一块负透镜，使物镜所成的像仍然在固定的分划板处. 这种系统称为内调焦系统，用以调焦的负透镜组称为调焦镜.

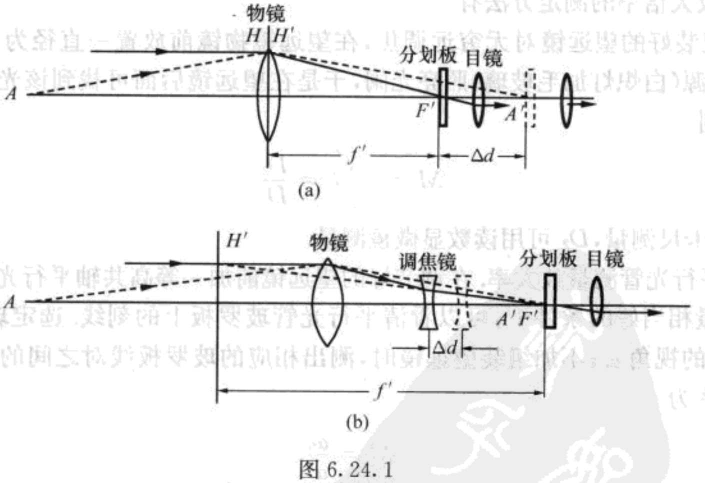


图 6.24.1

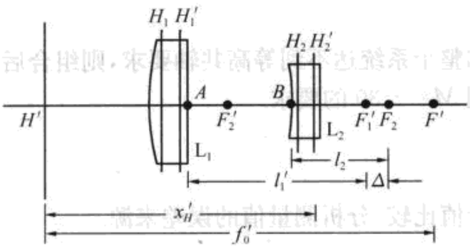


图 6.24.2

由于内调焦系统的尺寸小，携带方便，密封性能又好，所以在大地测量仪器中多采用内调焦系统做望远镜.

内调焦望远物镜是由正、负两组透镜组成的. 正透镜组 L_1 的焦距为 f_1'，截距为 l_1'；负透镜组 L_2 的焦距为 f_2'，截距为 l_2，其组合的光学系统如图 6.24.2 所示.

设组合物镜像空间的焦距为 f_0'，则

$$f_0' = -\frac{f_1' f_2'}{\Delta} \tag{6.24.1}$$

望远镜放大率为

$$M = -\frac{f_0'}{f_e'} \tag{6.24.2}$$

式中，f_e' 为望远镜目镜的焦距，则由(6.24.1)式、(6.24.2)式可得

$$\Delta = \frac{f_1' f_2'}{M f_e'} \tag{6.24.3}$$

正透镜组后表面顶点 A 和负透镜组前表面顶点 B 之间的距离由图 6.24.2 可得

$$\overline{AB} = \Delta + l_1' - l_2 \tag{6.24.4}$$

此组合物镜的主平面位置为

$$x_H' = \overline{H'H_2'} = f_2' \frac{\Delta - f_2 + f_1'}{\Delta} \tag{6.24.5}$$

理论上只要测出 f_1'、f_2'、f_e' 及 l_1'、l_2'，就可由(6.24.3)式和(6.24.4)式求得 Δ 和 $\overline{AB}$，从而可先将 L_1 和 L_2 组合成调焦望远物镜，然后再将此组合物镜与目镜组装成放大率为 M 的望远镜.

望远镜放大倍率的测定方法有

(1) 将组装好的望远镜对无穷远调焦，在望远镜物镜前放置一直径为 D_1 的圆孔光阑，用扩展光源(白炽灯加毛玻璃)照亮光阑，于是在望远镜后面可找到该光阑的实像，其直径为 D_2，则

$$M = -\frac{f_0'}{f_e'} = \frac{D_1}{D_2} \tag{6.24.6}$$

D_1 可用游标卡尺测量，D_2 可用读数显微镜测量.

(2) 用平行光管测量放大率. 在调节好的望远镜前加一等高共轴平行光管，在望远镜系统成像质量相当好的条件下，可以看清平行光管玻罗板上的刻线. 选定玻罗板上两线对，测出它们的视角 α_e；不加组装望远镜时，测出相应的玻罗板线对之间的视角 α_0，则望远镜的放大率为

$$M = \frac{\alpha_0}{\alpha_e} \tag{6.24.7}$$

(3) 测量望远镜放大率的一种简便方法是将物长与像长直接对比. 如图 6.24.3 所

示，将望远镜对准远处放置的标尺 AB(AB 垂直于望远镜光轴)，调节望远镜的筒长改变目瞳至物镜的距离，使像 $A'B'$清晰可见. 观察者用一只眼睛观察望远镜视场中标尺的像，另一只眼睛同时不通过望远镜直接观察标尺，经过几分钟适应性训练，不但可以同时看到 AB 和 $A'B'$，而且还能比较它们的视角. 例如，看到$A'B'$投影在

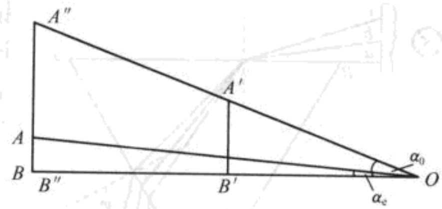


图 6.24.3

AB 平面上的$A''B''$一格的长度相当于AB 标尺 N 格的长度($A''B''$与 $A'B'$ 视角相等)，那么 N 就是望远镜的视角放大率.

实验 6.25 光学材料折射率的测定

折射率是光学材料的重要参数之一，在科研和生产实际中常需要测量它. 测量折射率的方法可分为两类：一类是应用折射定律及反射、全反射定律，通过准确测量角度来求折射率的几何光学方法，如最小偏向角法、掠入射法、全反射法和位移法等. 另一类是利用光通过介质(或由介质反射)后，透射光的相位变化(或反射光的偏振态变化)与折射率密切相关的原理来测定折射率的物理光学方法，如布儒斯特角法、干涉法、椭偏法等.

本实验要求综合已学过的光学知识和基本实验操作，查阅有关资料，拟定实验方案，完成对各种待测样品的折射率测定，从而对光学材料折射率的测量，在原理和方法上有更全面的认识.

【实验要求】

被测样品有：三棱镜、玻璃砖、平板玻璃、云母片(或盖玻片)、甘油、石蜡、水等.

实验室提供的仪器用具有：分光计、迈克耳孙干涉仪、读数显微镜、阿贝折射仪、钠光灯、汞灯、He-Ne 激光器、游标卡尺、螺旋测微器等.

(1) 测定三棱镜的色散曲线，并求出不同波长下折射率的不确定度.

(2) 测量云母片(或盖玻片)的折射率及厚度.

(3) 自行设计两种方法测定玻璃砖的折射率，分析结果的误差来源.

(4) 用偏振法测平板玻璃的折射率.

(5) 用阿贝折射仪测量甘油、石蜡等物质在不同温度下的折射率.

(6) 自行设计两种方法测定水的折射率(选作，不受上述仪器限制).

【实验原理】

在第 4 章中已介绍测量物质折射率的最小偏向角法和阿贝折射仪法，下面再简要介绍另外几种方法.

1. 掠入射法

掠入射法测介质折射率的原理如图 6.25.1 所示. 将待测介质(如玻璃)磨制成三棱